



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Cálculo numérico de la distribución de presiones en un foso de erosión de pila de puente experimental

Autor/a

Jose Antonio Joven Guerrero

Tutor/a

Allen Bateman Pinzón, Vicente Medina

Departament

Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

Intensificació

Enginyeria Hidràulica

Data

Juny 2015

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis tutores de tesina, Allen Bateman y Vicente Medina, el tiempo y la confianza que me han otorgado a lo largo de este tiempo, la paciencia que han mostrado y los conocimientos de mecánica de fluidos que me han enseñado.

A Carla, sin la que esto no habría sido posible, gracias por su cariño y por haber creído en mí en todo momento. A mis padres y a mi hermana, por su capacidad de hacerme aprender día a día, por apoyarme en todo momento, y hacerme ver el lado positivo de cada situación. A Antonio Huertas, por su apoyo incondicional y ser una gran fuente de motivación y superación.

A toda la comunidad de cfd-online.com que se encargan de mantener vivo el conocimiento y la motivación por la mecánica de fluidos computacional, ayudando a los principiantes sin esperar obtener nada a cambio.

También quiero agradecer a todo el equipo gits.ws su apoyo y amabilidad a lo largo de esta etapa, especialmente a Cristina y Francesco.

Gracias a todos.

RESUMEN

En la presente tesina se presenta un cálculo numérico de la distribución de presiones en el foso de erosión de una pila experimental, basándose en los experimentos realizados por Elyanne Rodríguez en 2007.

El software utilizado para realizar estos ensayos ha sido OpenFOAM® para el cálculo numérico y Salome para la generación de la malla. El procedimiento seguido con ambos programas será detallado en el capítulo 5 de este documento.

A pesar de su objetivo principal, esta tesina pretende desarrollar un documento de soporte para futuras investigaciones, a fin de poder suprimir gran parte del tramo de la curva de aprendizaje de este tipo software. Los casos se han corrido en un PC particular de gama media, con un procesador Intel® Core™ i5-2102 CPU @ 2.9GHz y una memoria RAM de 6.00 GB. Estas especificaciones se han traducido en simulaciones de duración de 7 a 8 horas para flujo laminar hasta alcanzar estabilización, y de 40 a 50 horas para flujo turbulento con un número medio de 1.5 millones de volúmenes de control.

Se ha desarrollado una primera serie de casos en condiciones de flujo laminar, a fin de estudiar y comprender el comportamiento del programa. Tras esta primera etapa, se ha implementado la turbulencia considerando las ecuaciones RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) y el modelo k-Epsilon desarrollado por Launder y Spalding en 1974.

Antes de obtener la ley de distribución de presiones, se ha procedido a calibrar las curvas de velocidades y las leyes de pared a fin de que se adapten a las teóricas ya contrastadas por Nezu y Nakagawa en 1993.

ABSTRACT

In this thesis, a numerical calculation of the pressure distribution in the scour hole of an experimental pier is presented, based on experiments conducted by Elyanne Rodriguez in 2007.

The software used for these tests was OpenFOAM® for numerical calculation and Salome for mesh generation. The procedure in both programs will be detailed in chapter 5 of this document.

Although its main objective, this thesis aims to develop a support document for future research, in order to eliminate much of the length of the learning curve of this software. Cases have been run in a mid-range PC, with an Intel® Core™ i5-2102 CPU @ 2.9GHz processor and 6.00 GB of Random Access Memory. These specifications have resulted in simulations lasting 7-8 hours to reach stabilization considering laminar flow, and 40-50 hours considering turbulent flow, with an average number of 1.5 million CVs.

A series of cases have been developed in laminar flow conditions in order to study and understand the behavior of the program. After this first stage of the thesis, the RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) turbulence equations and the k-Epsilon model developed by Launder and Spalding in 1974 have been considered and implemented in the code.

Before obtaining the pressure distribution law, we have proceeded to calibrate the velocity curves and wall laws in order to fit the theoretical ones, tested by Nezu and Nakagawa in 1993.

ÍNDICE

Índice	0
1 Introducción y objetivos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos.....	2
2 Estado del conocimiento	2
2.1 Mecanismos de erosión	2
2.1.1 Parametros que influyen en la erosion y el inicio del movimiento	4
2.1.2 Criterio de Shields, Umbral de movimiento.....	4
2.1.3 Vortices de Herradura	6
2.1.4 Influencia de la distribución de presión.	7
2.1.5 El fenómeno de la erosión local en pilas.....	8
2.2 Modelos de turbulencia	9
2.2.1 Modelo k-Epsilon	9
2.3 Ley de pared	11
3 OpenFOAM®.....	12
3.1 Estructura de archivos.....	12
3.1.1 Constant	13
3.1.2 System.....	13
3.1.2 Directorios de tiempo	13
3.2 InterFoam Solver	14
3.2.1 Formulación matemática	14
3.3 Modelo de turbulencia	16
3.4 Modelos de discretización	17
3.4.1Método de las diferencias finitas	17
3.4.2Método de volúmenes finitos.....	17
3.4.3Método de elementos finitos	17
3.5 La Malla	19
3.5.1 Malla no estructurada.....	19
3.5.2Malla estructurada.....	19

3.5.1 BlockMesh	20
3.5.2 Salome	21
4 Experimento a simular.....	22
4.1 Condiciones de los ensayos.....	22
4.2 Elección de las dimensiones de la pila	23
5 Simulación	25
5.1 Generación de la geometría	25
5.2 Generación de la malla	28
5.2.1 Malla no estructurada	30
5.2.2 Malla estructurada	31
5.2.3 Creación de grupos	35
5.1 Flujo Laminar.....	36
5.1.1 Condiciones de contorno aplicadas	36
5.2 Flujo Turbulento RANS	41
5.3 Calibración del modelo.....	41
5.3.1 Entrada de flujo en pistón.....	41
5.3.2 Entrada de flujo mediante aplicación GroovyBC.....	45
5.3.3 Ley de PARED	51
6 Resultados.....	55
6.1 Distribución de presiones totales	56
6.2 Distribución de p_rgh	59
7. Conclusiones	61
9 Referencias bibliográficas	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Foso de erosión local en el Nuevo Puente Independencia en el río Piura (PepeVasquez.com).....	1
Ilustración 2 Imagen de la erosión local de un obstáculo en el cauce de un río (USGS)	3
Ilustración 3 Umbral de movimiento del Criterio de Shields	5
Ilustración 4: Resultados de ensayos de la tesina de Elyan Rodriguez (2007)	8
Ilustración 5: Patología típica de fallo por erosión local, flujo de izquierda a derecha, Ingeniería de Ríos (Juan P. Martin Vide, 2003)	8
Ilustración 6: A la izquierda, evolución temporal de la erosión local en aguas claras y lecho vivo. A la derecha, erosión local en pilas según la velocidad de la corriente. Ingeniería de Ríos (Juan P. Martin Vide, 2003).....	9
Ilustración 7 Curvas adimensionales de Nezu y Nakagawa (1993).....	11
Ilustración 8 Estructura de directorio (cfd.direct).....	12
Ilustración 9 Estructura de series temporales del caso.....	13
Ilustración 10 Ejemplo de malla no estructurada generada con Salome.....	19
Ilustración 11 Ejemplo de malla estructurada (http://www.arc.vt.edu/)	20
Ilustración 12 Esquema de funcionamiento de caras de OpenFOAM® (http://www.OpenFOAM®.org/)	21
Ilustración 13: Canal de laboratorio utilizado en los ensayos. Fotografía de Elyanne Rodríguez.	22
Ilustración 14: Barrido laser registrando la geometría del foso. Fotografía de Elyanne Rodríguez (2007)	23
Ilustración 15: Geometría obtenida de la pila de 9 cm. Datos e imagen de Elyan Rodriguez....	23
Ilustración 16 Foso de erosión obtenido de la pila de 6 cm de diámetro (datos de Elyan Rodríguez).....	24
Ilustración 17 Puntos visualizados mediante AutoCad 2014	25
Ilustración 18 Generación de las splines	26
Ilustración 19 Superficie generada mediante la función <i>loft</i>	26
Ilustración 20 Volumen generado por extrusión.....	27
Ilustración 21 Volumen generado esculpido	27
Ilustración 22 Perforación del volumen de control mediante Salome	28
Ilustración 23 Volumen perforado por el cilindro pilar	29
Ilustración 24 Vista frontal del volumen de control.....	29

Ilustración 25 Vista posterior del volumen cortado	30
Ilustración 26 Parámetros de generación de malla no estructurada.....	30
Ilustración 27 Malla no estructurada del volumen de control	31
Ilustración 28 Vista en planta del volumen de control	32
Ilustración 29 Vista del volumen de control tras dividirlo en hexaedros	32
Ilustración 30 Selección de algoritmo de mallado.....	33
Ilustración 31 Selección de las hipótesis bidimensionales	33
Ilustración 32 Selección de las hipótesis unidimensionales	34
Ilustración 33 Vista superior de la geometría subdividida en hexaedros.....	34
Ilustración 34 Vista inferior de la geometría subdividida en hexaedros.....	34
Ilustración 35 Creación de grupos de parches en el volumen de control	35
Ilustración 36 Simulación de flujo laminar con condiciones de salida atmosféricas.....	39
Ilustración 37 Simulación de flujo laminar fijando velocidad de salida y presión con gradiente igual a 0 (perfil).....	40
Ilustración 38 Simulación de flujo laminar fijando velocidad de salida y presión con gradiente igual a 0	40
Ilustración 39 Gráficas de la evolución espacial de los perfiles de velocidades en el tramo inicial de la geometría.....	42
Ilustración 40 Gráficas de la evolución espacial de los perfiles de velocidades en el tramo inicial de la geometría.....	43
Ilustración 41 Afectación de los valores de la rugosidad al perfil de velocidades	44
Ilustración 42 Evolución espacial de los perfiles de velocidades con condiciones de velocidad de entrada logarítmicas.....	49
Ilustración 43 Evolución del perfil de velocidades en cortes equiespaciados cada 3 cm de longitud	49
Ilustración 44 Sección longitudinal del canal de calibración con superficie rota por la tensión del aire.....	50
Ilustración 45 Sección longitudinal del canal de calibración con la superficie estabilizada.....	50
Ilustración 46 Evolución de los perfiles de velocidad en los tres cortes del canal de calibración	51
Ilustración 47 Perfil de velocidades y ley de pared teóricas según las condiciones del experimento.....	52

Ilustración 48 Comparación de curvas de velocidades y adimensionales en rojo y azul, para el caso simulado ($K=0.41$) y el caso teórico, respectivamente.	53
Ilustración 498 Comparación de curvas de velocidades y adimensionales en rojo y azul, para el caso simulado ($K=0.81$) y el caso teórico, respectivamente.	53
Ilustración 50 Comparación de curvas de velocidades y adimensionales en rojo y azul, para el caso simulado ($K=0.81$ y viento de 0.8 m/s) y el caso teórico, respectivamente.	54
Ilustración 51 Corte en planta a una altura de 5cm (centro del flujo) y su distribución de velocidades en el eje X (datos con $K=0.41$)	54
Ilustración 52 Corte en planta a una altura de 5cm (centro del flujo) y su distribución de velocidades en el eje X (datos con $K=0.81$)	55
Ilustración 53 Foso de erosión y pila visualizado con ParaView	55
Ilustración 54 Posición de la lámina libre de fluido visualizado con ParaView ($K=0.81$)	56
Ilustración 55 Corte longitudinal del perfil de velocidades visualizado con ParaView ($K=0.81$) .	56
Ilustración 56 Mapa de distribución de presiones totales en planta	57
Ilustración 57 Vista oblicua de la distribución de presiones totales del lecho	57
Ilustración 58 Distribución de presiones longitudinal en el centro del lecho ($K=0.81$)	58
Ilustración 59 Distribución de presiones transversal en el eje de la pila ($K=0.81$)	58
Ilustración 60 Distribución de p^* en planta para el modelo ajustado con $K=0.81$	59
Ilustración 61 A la izquierda, corte transversal de foso. A la derecha, corte longitudinal, ambos centrados en la pila ($K=0.81$).	59
Ilustración 62 Distribución de p^* en el foso de erosión para $K=0.41$	60

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La erosión local en pilas de puente y estribos es la principal causa de fallidas de puentes en todo el mundo. En los últimos años, el estudio de los efectos hidráulicos no ha avanzado en el mismo orden de magnitud que los conocimientos de estructuras y comportamiento de sólido rígido. Debido a este grado de incertidumbre sobre la mecánica de fluidos y cómo afecta a nuestras infraestructuras, las medidas para evitar la erosión local en puentes se basan en estimaciones y aproximaciones de la realidad poco precisas y con un alto grado de peligrosidad. Cabe destacar que en adición a las grandes pérdidas económicas y costes de impacto ambiental, el fallo de la estructura puede provocar tragedias humanas.



Ilustración 1 Foso de erosión local en el Nuevo Puente Independencia en el río Piura (PepeVasquez.com)

Son múltiples los ensayos de laboratorio en los que se ha intentado definir la velocidad de corte del fluido y el umbral del inicio de movimiento, basándose en leyes conocidas de transporte de fondo como el criterio de Shields. No obstante, el equilibrio de cada una de las partículas sólidas que rodean la pila viene definido por las fuerzas que actúan en ella. De esta manera, las presiones generadas por el flujo y los vórtices turbulentos modifican el esquema de fuerzas alterando así la velocidad y tensión de corte necesarias para desplazarlas y generar erosión.

Los estudios realizados por Allen Bateman, Vicente Medina y Alex Guevara en *Experimental Study of the influence of non-hydrostatic pressure in the Rip Rap pier protection* de 2010 son prueba del grado de afectación de la distribución de presiones no hidrostáticas en el umbral de movimiento de partículas alrededor de pilas de puentes.

Gracias a los avances actuales en métodos numéricos y la evolución de computadoras cada vez más potentes, es posible aproximar los comportamientos de los fluidos mediante software que implemente las ecuaciones de conservación de masa y de momento, discretizando un dominio en un número finito de elementos o volúmenes.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de la presente tesina, es calcular la distribución de presiones en la superficie del lecho en un foso de erosión obtenido en ensayos de laboratorio.

Para realizar los cálculos se empleará el software de código libre OpenFOAM®. De manera adicional, se buscará dar validez al modelo de turbulencia k-Epsilon integrado por el programa, basándonos en las leyes de pared y de distribución de velocidades teóricas. Es por esto será importante obtener un estudio exhaustivo de cómo afectan al comportamiento del fluido la modificación de las variables que caractericen las leyes de pared.

Para realizar un cálculo preciso, la parte más crucial de la tesina será la generación de la malla a partir de una batimetría en formato .xyz. Además del objetivo principal, una meta adicional será el desarrollar un método válido y robusto para generar mallas estructuradas en un formato importable a los principales estructuras de software de ingeniería basadas en el método de volúmenes finitos.

Actualmente, el Grupo de Investigación en Transporte de Sedimento ha estado utilizando el software OpenFOAM® desde hace una serie de años, implementando su sistemas de turbulencia y de análisis de mecánica de fluidos para estudios de flujos complejos (por geometría y turbulencia).

Debido a estos factores y a que esta tesina contemplará exclusivamente una tipología de pila y de condiciones hidráulicas, la redacción de este documento busca ofrecer una guía práctica para desarrollar simulaciones de flujo de lámina libre. De esta manera, para futuras simulaciones del departamento, bastará con modificar los parámetros hidráulicos y las propiedades geométricas que caractericen la situación.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 MECANISMOS DE EROSIÓN

La gran mayoría de los autores afirman que el foso tiene una geometría sencilla, en forma de cono truncado invertido, con eje aproximadamente situado en el punto de máxima erosión.

Dada una corriente de un fluido, si situamos cualquier estructura obstaculizando la misma, se genera un fenómeno en tres dimensiones debido a la presencia del obstáculo. Especificando que procesos se desarrollan en el caso de una pila en un flujo de lámina libre podemos observar:

- Vórtice de herradura: El flujo se acelera alrededor de ésta, de manera que el gradiente de velocidad vertical del flujo se transforma en un gradiente de presión en la parte donde impacta directamente sobre la estructura. Este gradiente de presión provoca una corriente vertical hacia abajo que impacta en el lecho, en la base de la pila, donde se forma un vórtice que arrastra el material del lecho alrededor y aguas abajo de la estructura. Éste es el llamado vórtice de herradura, conocido por este nombre debido a la forma que adquiere cuando se observa desde encima.
- Vórtice superficial: En la superficie libre del agua, el flujo y la pila interactúan formando una ola llamada vórtice superficial.
- Vórtice de estela: Detrás de la estructura, donde el flujo se ha separado, se producen unos vórtices de estela.

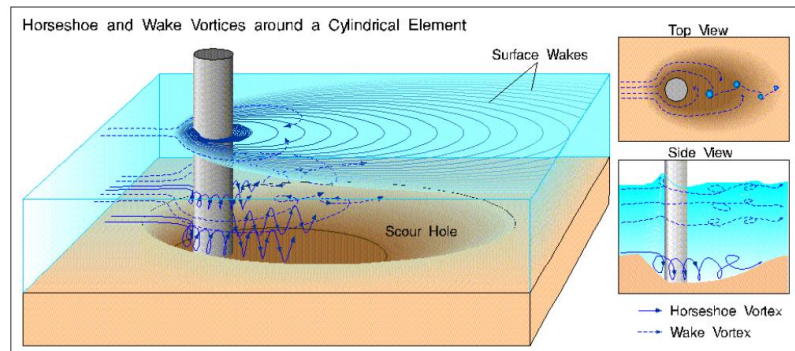


Ilustración 2 Imagen de la erosión local de un obstáculo en el cauce de un río (USGS)

De esta manera, la erosión se inicia con la aceleración del flujo alrededor de la pila, posteriormente se forma la cavidad de erosión por la acción de los vórtices primarios y del flujo descendente hasta el momento que no aumenta más la profundidad (o se vuelve insignificante) y llegamos a la situación de equilibrio.

En la parte posterior de la pila, el material es levantado por los vórtices frente a esta y es arrastrado hacia aguas abajo donde se va acumulando formando una elevación del lecho respecto a la fosa de erosión que se forma por la discontinuidad que forma la pila en el flujo de velocidades.

En la zona de erosión aguas arriba, donde se aprecian los vórtices de herradura, existe la erosión más activa, esta zona está en continua actividad, incluso cuando el proceso erosivo alcanza el punto de equilibrio.

A partir de aquí hacia aguas arriba, el foso avanza con dos pendientes diferentes. La primera, situada tocando la zona de los vórtices, es un poco más elevada que el ángulo de reposo del sedimento.

Son precisamente los vórtices lo que permiten que el material se sostenga en una posición que si no hubiera nada, sería inestable. La segunda pendiente es la situada en la parte superior del foso y es menor que la anterior y aproximadamente igual al ángulo de reposo. La transición entre estas dos partes diferenciadas, se produce a través de una estrecha terraza que va rodeando toda la pared del foso hasta desaparecer suavemente.

Los vectores de velocidad son muy verticales delante de la pila mientras que la parte aguas abajo de la pila se vuelven más horizontales. Los vectores verticales son los responsables del levantamiento del material y los horizontales del arrastre de estas partículas hacia la parte trasera de la pila.

Por otra parte, en la superficie libre del agua, el flujo y la pila los vórtices herradura interactúan formando una ola llamada vórtice superficial. Además, detrás de la estructura, donde el flujo se ha separado, se producen unos vórtices de estela.

Como consecuencia se produce un montículo detrás de la pila. Los vórtices adoptan un papel muy importante en cuanto al traslado de partículas. La turbulencia en ráfagas se da cuando la raíz de vórtice choca con el lecho produciendo desplazamientos de partículas.

2.1.1 PARAMETROS QUE INFLUYEN EN LA EROSION Y EL INICIO DEL MOVIMIENTO

Los parámetros que influyen en la erosión y el inicio del movimiento son:

- Parámetros que caracterizan el fluido: su densidad y la viscosidad, que a su vez dependen de temperatura y salinidad.
- Parámetros que caracterizan el sedimento: tamaño medio, desviación estándar del tamaño, densidad y ángulo de reposo.
- Parámetros que caracterizan el flujo: calado, velocidad media, pendiente de energía del flujo, pendiente del lecho y tensión de corte.
- Parámetros que caracterizan el obstáculo: forma, dimensiones, orientación relativa a la dirección del flujo.

2.1.2 CRITERIO DE SHIELDS, UMBRAL DE MOVIMIENTO

El siguiente texto está basado en el libro de Juan Pedro Martín Vide "Ingeniería de ríos", 2003.

Un lecho granular que soporta la circulación de una corriente de agua vera en algún momento desplazada una partícula por la fuerza de arrastre del agua. Saber en qué condiciones ocurre esto es el problema del umbral, principio, o condición crítica del arrastre o movimiento de fondo, problema intensamente investigado en hidráulica fluvial, con gran implicación práctica sobre la erosión de un fondo. El conocimiento que se tiene proviene principalmente de ensayos de laboratorio con arenas uniformes. Aunque no hay acuerdo completo, si parece dibujarse un consenso en torno a un resultado conocido como el ábaco de Shields (1936).

Un lecho granular con agua en reposo también puede ver arrancadas sus partículas si el agua se agita lo suficiente. La intensidad de la turbulencia creada es un factor en el arranque, pero precisamente es el factor no considerado en lo que sigue. La circulación del agua ejerce una fuerza sobre el fondo, única acción considerada. La turbulencia del movimiento del agua es la "normal" en un resumen uniforme de lámina libre y excluye por tanto la turbulencia de gran intensidad que sería causada por circunstancias especiales.

La acción del agua sobre el fondo puede caracterizarse por una tensión cortante en el fondo t . La resistencia de la partícula a ser movida puede relacionarse con su peso sumergido, el cual es función de $(\gamma_s - \gamma)$, peso específico sumergido, y del tamaño D que caracteriza el volumen. Con estas tres variables puede formarse el parámetro adimensional:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) * D}$$

Es conocido como el parámetro de Shields o de movilidad, que compara como cociente la fuerza promotora del movimiento (acción de arrastre proporcional a τD^2) con la fuerza estabilizadora (peso, proporcional a $(\gamma_s - \gamma) * D^3$). Como primera aproximación, la tensión en el fondo toma valor $\tau = \gamma R_h I$ con R_h radio hidráulico e I pendiente motriz, la expresión que se obtiene haciendo equilibrio entre peso y rozamiento para una rebanada vertical de flujo en lámina libre.

La acción del agua sobre el fondo puede representarse también por una velocidad característica llamada velocidad de corte v^* . Esta velocidad se define convencionalmente a partir de la tensión τ como $\tau = \rho v_*^2$. También puede definirse a partir del perfil de velocidades y entonces como primera aproximación, puede usarse $\frac{v}{v_*} = 8.0 \left(\frac{y}{D}\right)^{1/6}$ siendo v la velocidad

media. De esta manera, la velocidad significativa para el fondo es v_* , la mas indicada para constituir un numero de Reynolds llamado granular, definido como $Re^* = v_* D / \mu$, con μ viscosidad cinematica.

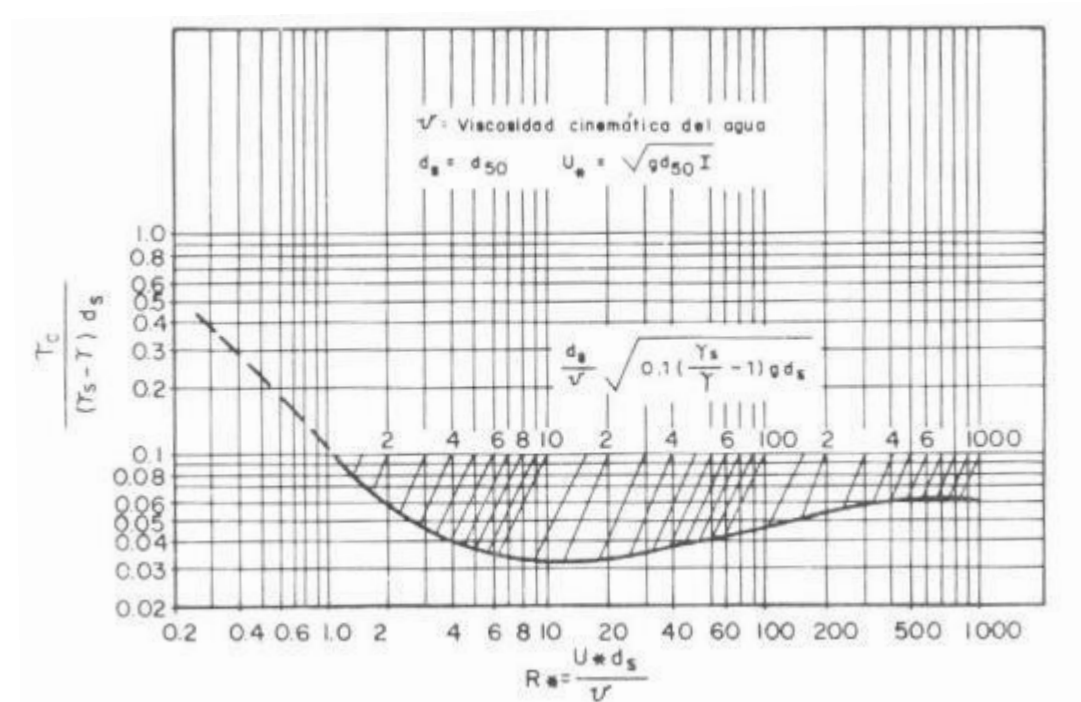


Ilustración 3 Umbral de movimiento del Criterio de Shields

Este ábaco representa la curva del principio del movimiento representada en los ejes $\bar{\tau} = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) D}$ y Re^* . Por debajo de esta no hay movimiento. La tensión adimensional debe alcanzar el valor de la ordenada para cada abscisa para empezar el movimiento. Como D participa en el denominador de τ , la tensión debe ser mayor cuanto mayor sea el tamaño de la partícula, dado que cuesta más mover una partícula gruesa que una fina. Por otro lado, a mayor Re^* el movimiento es más turbulento alrededor de la partícula y la curva de Shields tiende a ser horizontal.

Si $Re^* > 400$ el movimiento se llama turbulento rugoso, ya que la altura D del grano es mayor que la subcapa límite laminar. En movimiento turbulento rugoso, la tensión necesaria para iniciar el movimiento o tensión crítica no depende ya del número de Reynolds. Su valor en el ábaco converge a 0.056. Este es el caso más frecuente en ríos, por lo que esta última expresión tan sencilla puede sustituir el propio ábaco. Si $Re^* < 5$ el movimiento es turbulento liso ya que la subcapa límite laminar cubre la altura del grano. Entre los valores 5 y 400 el movimiento se caracteriza como turbulento intermedio.

2.1.3 VORTICES DE HERRADURA

Los vórtices de herradura en el inicio del movimiento han sido una cuestión extensamente estudiada, casi siempre en pilas circulares. Este tipo de vórtices vienen caracterizados por tres parámetros: el diámetro, la velocidad y la fuerza o intensidad que tienen. Por lo que respecta a la geometría del vórtice, su forma es aproximadamente elíptica en el plan o vertical de la línea de simetría del flujo, y su principal medida es un promedio entre el diámetro máximo y mínimo:

$$D_v = a + b$$

Siendo a y b los radios máximo y mínimo.

La velocidad, se puede expresar como:

$$V_0 = \pi D_v N$$

Siendo N la frecuencia de rotación del centro del vórtice.

Finalmente, la fuerza del vórtice que se define como:

$$\Gamma = \pi D_v V_0$$

Uno de los aspectos más influyentes en los vórtices de herradura es la potencia por unidad de masa o velocidad de disipación de la energía contenida en los mismos. Este concepto fue estudiado por Kolmogorov(1941) y otros autores posteriormente. No obstante, la formulación de la erosión local en pilas de puente fue definida por Bateman et al (2005), estableciendo una proporcionalidad entre la velocidad del flujo y la potencia de un vórtice, afectados por la constante α .

$$Potencia = \frac{d\left(\frac{v^2}{2g}\right)}{dt} = \frac{\alpha u^3}{l}$$

Siendo:

u: velocidad del flujo.

l: el tamaño del vórtice.

α : Constante de proporcionalidad.

2.1.4 INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN.

En los estudios realizados por A. Bateman, M. Fernández y G. Parker en su artículo de *Morphodynamic model to predict temporal evolution of local scour in bridge piers*, se demostró la existencia ~~la existencia~~ de un límite físico para la evolución temporal de erosión local y las fases en las cuales se había desarrollado dicho proceso. En adición a esto, se estudió la afectación de la distribución no hidrostática de presiones alrededor de la pila.

Mediante un sistema de piezómetros situados alrededor de la pila, se observaron las distribuciones de presiones en una línea normal al flujo, concluyendo que el flujo escapaba en la zona de presión mínima empujando el sedimento con una presión normal al lecho y proporcional a:

$$P_{nh} = \frac{\gamma \delta h}{\delta z} D_m$$

Siendo:

P_{nh} la presión ejercida por la filtración del flujo

h la carga hidráulica entre dos puntos

z la dirección del flujo

D_m el diámetro medio del sedimento

De esta manera, se asumió este concepto como si el sedimento perdiera parte de su peso. Según los resultados que se obtuvieron, el gradiente de energía de filtración era del orden del 11%. Siendo el diámetro medio del sedimento de 1 mm, la presión se caracterizó del orden de 1.13 N/m^2 el cual es comparable al umbral de movimiento (0.96 N/m^2). No obstante esta P_{nh} actúa en la misma dirección del peso, desfavoreciendo el ratio F. estabilizadoras/F. desestabilizadoras. De esta manera las filtraciones alteraron en ese caso el peso de las partículas en un 10%.

2.1.5 EL FENÓMENO DE LA EROSIÓN LOCAL EN PILAS

El causante principal del fenómeno de erosión local es la aparición de velocidades mayores que las medias de la corriente, acompañadas por un sistema de vórtices frontales, laterales y de estela detrás de la pila. Este sistema de vórtices “aspira” los granos del lecho erosionando las cercanías de la pila. El fondo generado es más profundo y en la cara frontal de la pila y dispone de una pendiente más suave en la parte posterior que finaliza en un depósito de sedimento.

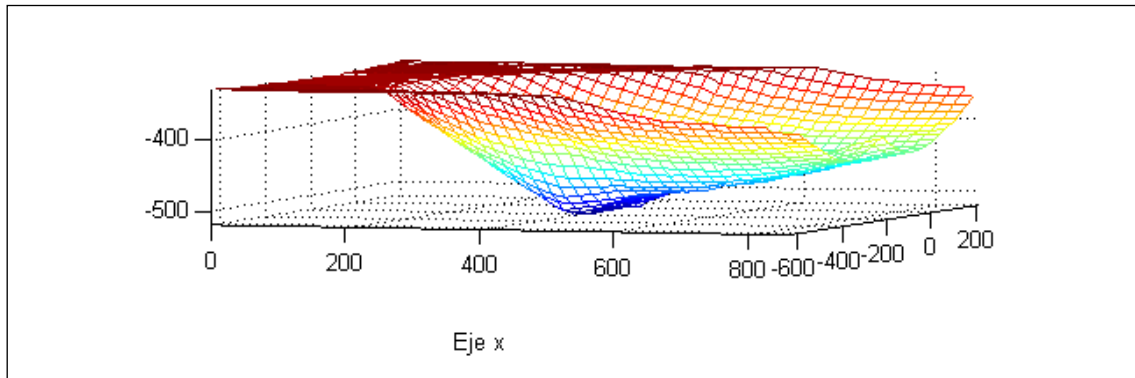


Ilustración 4: Resultados de ensayos de la tesina de Elyan Rodriguez (2007)

Como en la mayoría de los fenómenos de erosión, existe una dependencia directa entre el flujo y el foso de socavación. De esta manera, si las condiciones hidráulicas son permanentes, se alcanza un equilibrio en la forma y el tamaño de los fosos.

Como se puede observar, los fosos se sitúan precisamente donde los daños al puente pueden ser más relevantes, siendo la patología típica de un fallo por erosión local la situación en la que la pila se hunde y vuelca hacia aguas arriba.

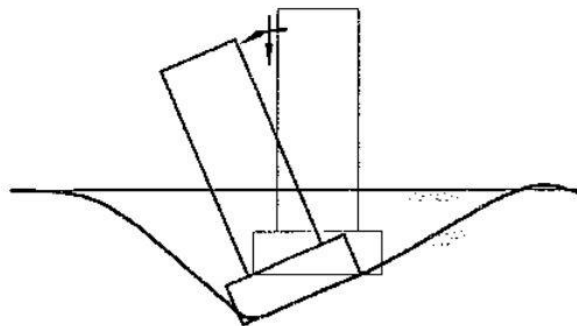


Ilustración 5: Patología típica de fallo por erosión local, flujo de izquierda a derecha, Ingeniería de Ríos (Juan P. Martín Vide, 2003)

La erosión local puede suceder por dos causas principales:

- Erosión de aguas claras: la corriente no es capaz de poner en movimiento el material del lecho del río, pero los vórtices sí son capaces de socavar la pila. En esta situación,

la erosión local de comienzo cuando la velocidad es aproximadamente la mitad de la velocidad umbral para el lecho en general. Para esta modalidad, no existe erosión en el foso una vez alcanzado el equilibrio.

- Erosión en lecho vivo: En este caso, existe un transporte general de sedimentos en el lecho al mismo tiempo que la erosión local. La cantidad de material transportado por la corriente que entra en el foso se compensa con la cantidad que sale.

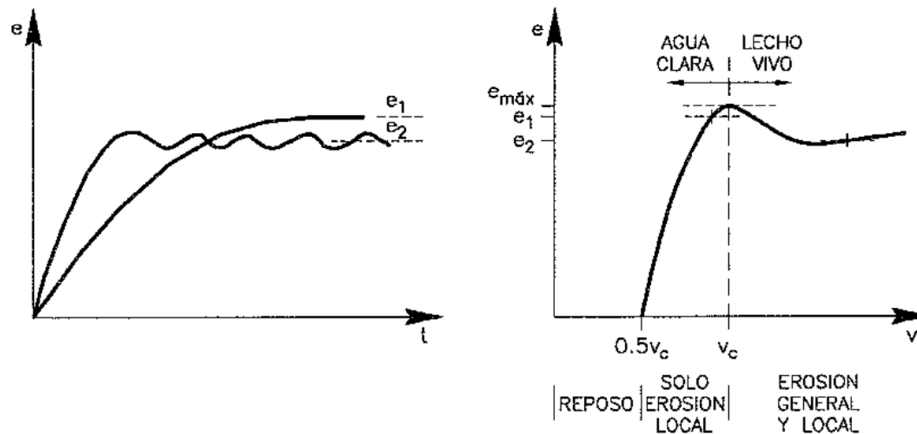


Ilustración 6: A la izquierda, evolución temporal de la erosión local en aguas claras y lecho vivo. A la derecha, erosión local en pilas según la velocidad de la corriente. Ingeniería de Ríos (Juan P. Martín Vide, 2003)

Gracias a la experimentación en laboratorio se ha deducido que los fosos de equilibrio en condiciones permanentes son aproximadamente iguales. Además, el foso máximo parece formarse si la corriente es tal que el fondo está en el límite entre aguas claras y lecho vivo, es decir en condiciones de umbral de movimiento.

2.2 MODELOS DE TURBULENCIA

2.2.1 MODELO K-EPSILON

El modelo K-epsilon es el más común en la mecánica de fluidos computacional (CFD). Sin embargo, es un modelo que no trabaja correctamente en casos en que los gradientes de presiones sean demasiado significativos (Wilcox, David C, 1998). Se basa en dos ecuaciones de transporte que describen la turbulencia. Fue creado a fin de mejorar el modelo de longitud de mezcla, así como hallar una alternativa a las escalas de longitud de turbulencia para flujos moderados y de alta complejidad. Sin embargo, las ecuaciones exactas contienen incontables parámetros. Es por esto que Launder y Spalding (1974) desarrollaron el modelo "Standard" k-epsilon que se utiliza hoy en día para entender los sucesos principales.

- La primera variable de transporte determina la energía en la turbulencia, se denomina energía cinética turbulenta (K).

$$\frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho k u_i)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} \frac{\delta k}{\delta x_j} \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

- La segunda variable de transporte es la disipación turbulenta (ϵ) la cual determina el ratio de disipación de la energía cinética turbulenta.

$$\frac{\delta(\rho\epsilon)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho\epsilon u_i)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\delta\epsilon}{\delta x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \frac{C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2}{k}$$

Siendo:

u_i la componente de la velocidad en la dirección correspondiente.

E_{ij} representa el ratio de deformación

μ_t representa la viscosidad Eddy

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon}$$

Los valores de estos parámetros se han obtenido mediante una gran cantidad de iteraciones y experimentos en un amplio abanico de flujos turbulentos obteniendo:

$$C_\mu = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.00$$

$$\sigma_\epsilon = 1.30$$

$$C_\epsilon = 1.44$$

$$C_{2\epsilon} = 1.92$$

De esta manera, el modelo es útil para modelos con baja tensión de cizalla con gradientes de presiones relativamente pequeños (Bardina, Huang, Coakley, 1997). Es importante decir que k-Epsilon no sería la elección adecuada para *inlets* y compresores

2.3 LEY DE PARED

En mecánica de fluidos, la ley de muro establece que la velocidad media de un flujo turbulento en un punto en particular es proporcional al logaritmo de la distancia desde ese punto hasta el muro, o en caso de mecánica de ríos, la distancia al lecho. Esta ley fue publicada por Theodore von Kármán en 1930.

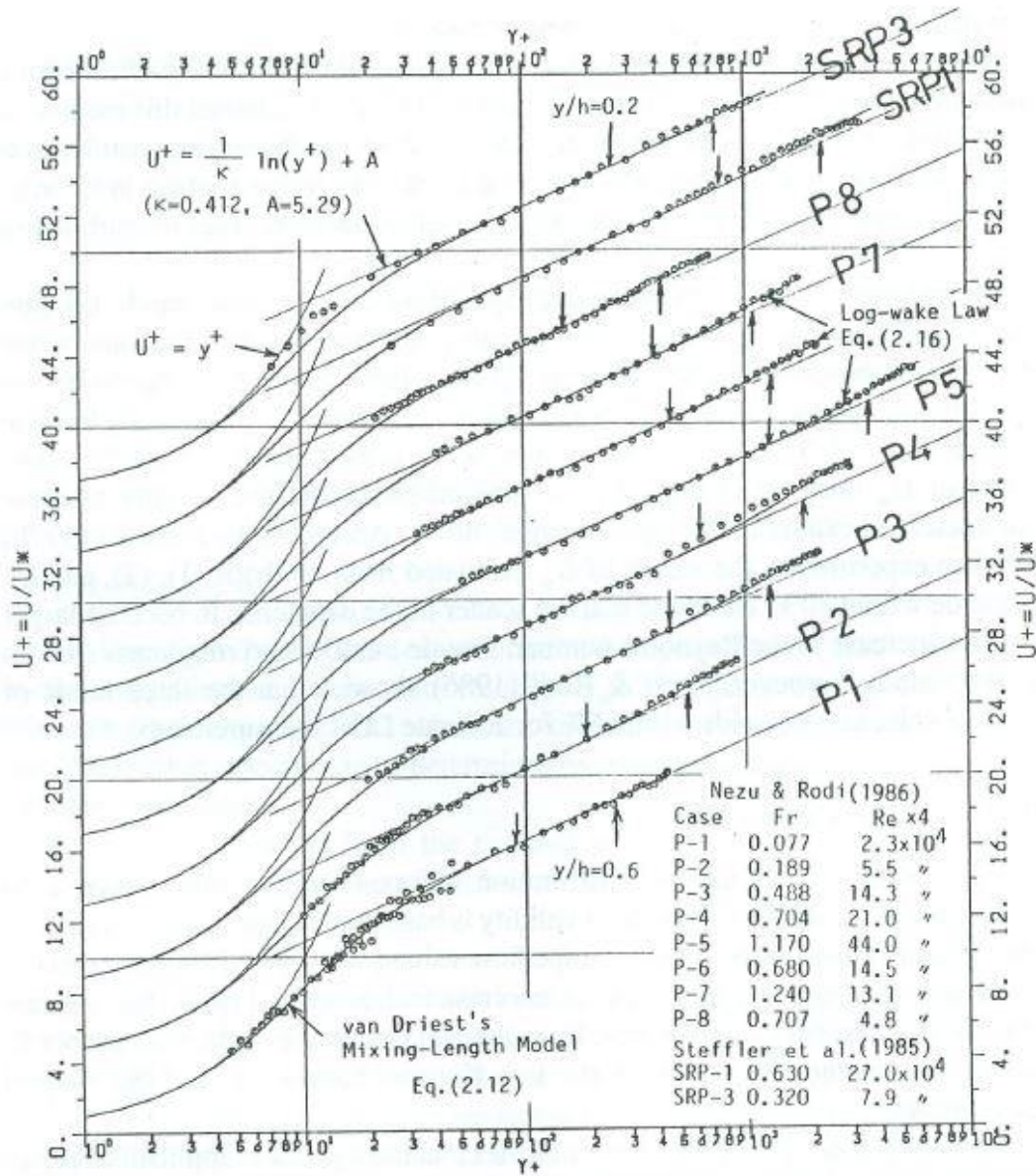


Ilustración 7 Curvas adimensionales de Nezu y Nakagawa (1993)

La formulación de las curvas adimensionales de la ley de pared es:

$$u^+ = \frac{u(z)}{u^*} \quad y^+ = \frac{z \cdot u^*}{\nu}$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad u^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C^+$$

Siendo:

τ_0 la tensión de corte

ρ la densidad del fluido

u^* la velocidad de corte

k la constante de Von Kármán

C^+ la constante de valor 5,39 (Nezu y Nakagawa, 1993)

Es importante destacar que estas curvas se cumplirán en zonas en las que la tensión de cizalla sea aproximadamente constante, y estemos lo suficientemente lejos de la pared para que los efectos viscosos sean prácticamente despreciables.

3 OPENFOAM®

OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation) es un software de código libre de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) que dispone un amplio abanico de usuarios en muchas áreas de la ingeniería y la ciencia, tanto de organizaciones comerciales como académicas.

Es capaz de simular desde flujos complejos de fluidos, considerando reacciones químicas, turbulencia y transmisión de calor, hasta dinámicas de sólido rígido y electromagnetismo.

3.1 ESTRUCTURA DE ARCHIVOS

La estructura básica de directorios de OpenFOAM® contiene un mínimo de archivos a fin de correr adecuadamente la aplicación:

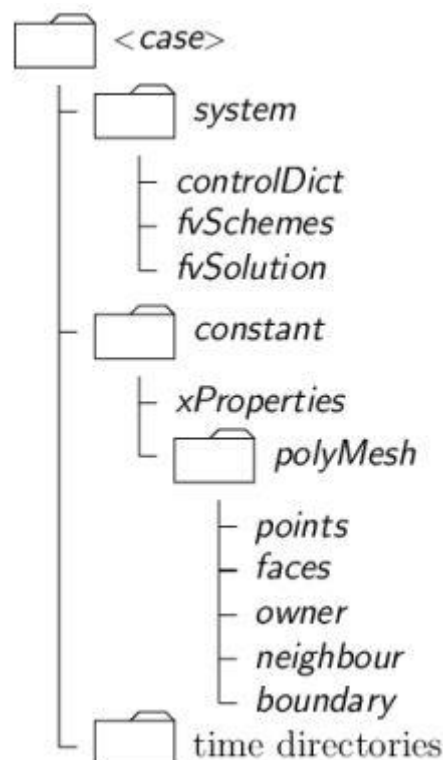


Ilustración 8 Estructura de directorio (cfd.direct)

3.1.1 CONSTANT

Esta carpeta contiene una descripción detallada de la malla del caso en la subcarpeta *polyMesh* además de las propiedades físicas que se quieran asignar a la simulación, por ejemplo viscosidades y densidades (*transportProperties*) o el vector que define la aceleración de la gravedad (*g*).

3.1.2 SYSTEM

Defina los parámetros asociados a la simulación en sí misma. Como mínimo contiene 3 archivos:

- *controlDict*: se fijan los parámetros de control incluyendo el tiempo de inicio y de final, los Δt y los intervalos de escritura.
- *fvSchemes*: se definen los esquemas de discretización utilizados.
- *fvSolution*: donde hayamos las ecuaciones que se van resolver, las tolerancias y otros parámetros para fijar la computación.

3.1.2 DIRECTORIOS DE TIEMPO

Se basa una serie de carpetas asociadas a intervalos de tiempo. Cada una de estas carpetas contiene una serie de datos asociados a su instante de tiempo en la simulación.

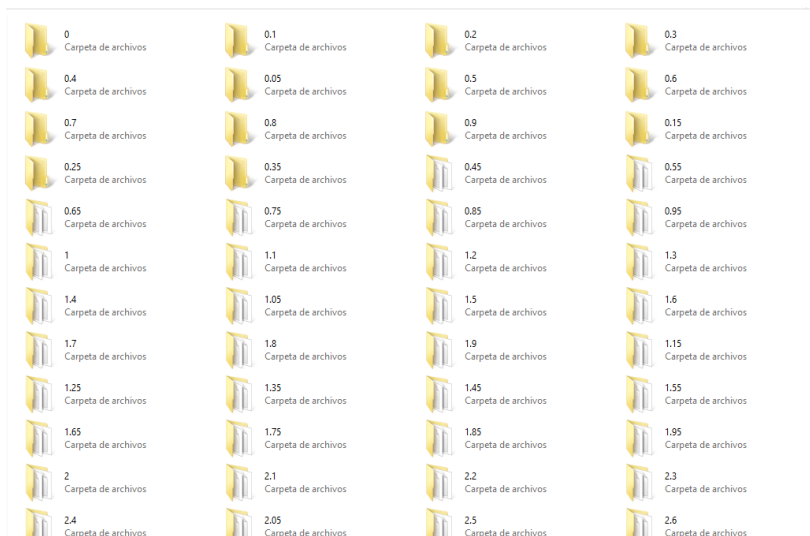


Ilustración 9 Estructura de series temporales del caso

En la carpeta 0 se encuentran los valores y las condiciones de contorno que se deben especificar como condiciones iniciales antes de correr la simulación para definir el caso. Una vez se inicia el proceso, el propio programa genera las carpetas de los siguientes instantes de tiempo escribiendo los resultados obtenidos por el *solver* del modelo. Por ejemplo, la velocidad *U* y la presión *P* se definen en los directorios 0/U y 0/p respectivamente.

3.2 INTERFOAM SOLVER

La simulación que pretendemos desarrollar en este proyecto se caracteriza por una alta interacción entre agua y aire. OpenFOAM® dispone de interFoam, un solver multifásico capaz de trabajar con estos requisitos. A continuación se presenta la formulación matemática y discretización de ecuaciones utilizados por interFoam.

3.2.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

3.2.1.1 CONTINUIDAD Y ECUACIONES DE MOMENTUM

Un fluido en movimiento está gobernado por una serie de ecuaciones que representan la conservación de la masa, el momento y la energía. En un sistema tridimensional, las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos se puede representar en forma diferencial (Rutherford Aris, 1999):

Conservación de la masa:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{u}) = 0$$

Conservación del momento:

$$\frac{\delta \rho \mathbf{u}}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

Conservación de la energía:

$$\frac{\delta \rho e}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \rho Q$$

Donde ρ es la densidad del fluido, \mathbf{u} es el campo de velocidades tridimensional, $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones, e es la energía específica total, Q es el volumen de energía, \mathbf{q} el flujo de calor y \mathbf{g} es la gravedad.

Este sistema de tres ecuaciones es indeterminado dado que el número de incógnitas supera el número de ecuaciones. De esta manera, es necesario incluir un nuevo conjunto de ecuaciones. Para un fluido Newtoniano, incompresible e isotérmico, las ecuaciones anteriores se pueden simplificar como:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\delta \mathbf{u}}{\delta t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{u}) = \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u})$$

En este caso, ν es la viscosidad cinemática del fluido y p la presión cinemática. Si multiplicamos la ecuación del momento por la densidad del fluido, la forma final de las ecuaciones de continuidad y momento para un tipo específico de fluido son:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\delta \rho u}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho g + F$$

Donde P es la presión, τ es el tensor de tensión viscosa y F representa la fuente de momento dada a la tensión superficial.

$$F = \int_{S(t)} \sigma \kappa' n' \delta(x - x') dS$$

En esta ecuación, σ representa el coeficiente de tensión superficial, κ es la curvatura y n es el vector normal de la interfase. La tensión viscosa se puede reformular obteniendo más optimización.

$$\nabla \cdot \tau = \nabla \cdot (\mu [\nabla u + (\nabla u)^T]) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) + (\nabla u) \cdot \nabla \mu$$

La presión modificada p^* (p_rgh en OpenFOAM®) se adopta en interFoam suprimiendo la presión hidrostática de la presión. Esta consideración facilita la especificación de la presión en los contornos del dominio (Rusche, 2002). El gradiente de la presión modificado se define como:

$$\nabla p^* = \nabla P - \nabla(\rho g \cdot x) = \nabla P - \nabla \rho g - g \cdot x \nabla \rho$$

3.2.1.2 PARÁMETRO DE FASE

En el solver de interFoam se aplica el método convencional de volúmenes finitos presentado por Hirt y Nichols (1981). En adición a esto utiliza α como parámetro de fase para definir que porción de cada celda se encuentra ocupada por el fluido.

De esta manera:

$$\alpha(x, y, z, t) = \begin{cases} 1 & \text{Volumen ocupado por fluido 1} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{zona de interfase} \\ 0 & \text{zona ocupada por fluido 2} \end{cases}$$

El transporte de α en el tiempo se expresa mediante la función:

$$\frac{\delta \alpha}{\delta t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0$$

Esta ecuación nos muestra que para un fluido incompresible, la conservación de la masa es equivalente a la conservación de volumen y por lo tanto la conservación de la función α . Las propiedades locales del fluido como la densidad y la viscosidad, se consideran como una mezcla de las propiedades físicas de ambos fluidos.

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2$$

La conservación de la fracción de fase es esencial, particularmente en el caso de fluidos de alta densidad, donde pequeños errores en la fracción de volumen generan errores significativos en las propiedades físicas. Muchos investigadores han presentado técnicas alternativas para superar este problema. La mejor de ellas hoy en día es la formulada por Weller (2002), basada

en la inserción de un término extra en la función de la fracción de fase, el término de compresión artificial:

$$\frac{\delta\alpha}{\delta t} + \nabla \cdot (\alpha \bar{u}) + \nabla \cdot (u_r \alpha (1 - \alpha)) = 0$$

Donde $u_r = u_1 \cdot u_2$ es el vector de velocidades relativas entre ambos fluidos, también llamado como velocidad de compresión (Berberovic et al., 2009) y \bar{u} es la velocidad media, calculada como:

$$\bar{u} = \alpha u_1 + (1 - \alpha) u_2$$

3.3 MODELO DE TURBULENCIA

El proceso de transferencia de energía de las escalas más grandes a las más pequeñas fue definido por Kolmogorov (1941). Para ello utilizó los espectros turbulentos de energía. Las escalas de Kolmogorov son:

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\varepsilon = \frac{U^3}{L}$$

Donde η es la escala más pequeña de turbulencia, U es la velocidad media y L es la longitud característica. Es necesario para $N=L / \eta$ celdas capturar todas las escalas en una dirección. Extrapolándolo para un dominio tridimensional, el número de celdas necesario para capturar todas las escalas es $N_{3D} = (Re^{\frac{3}{4}})^3 = Re^{9/4}$.

La metodología para resolver las ecuaciones de Navier Stokes y todos los espectros de energía se denomina como DNS (direct numerical simulation). Esta metodología necesita una malla altamente fina y de un coste computacional muy grande, de modo que será aplicable para casos de dominios poco ambiciosos y numero de Reynolds bajo.

El método RAS (Reynolds Average Simulation) o RANS (Reynolds Average Navier-Stock) soluciona las ecuaciones de Navier-Stokes en tiempos promedio mediante las ecuaciones de Reynolds. El modelo de turbulencia RANS se clasifica a través del número de ecuaciones de transporte adicionales, las cuales necesitan ser resueltas mediante las ecuaciones de flujo RANS.

El modelo k- ε se (Launder y Spalding, 1974) basa en dos ecuaciones, una para k y otra para ε , que representan energía cinética turbulenta y el ratio de disipación viscosa respectivamente. Para números de Reynolds elevados, los k- ε estándar necesitan integrar funciones de turbulencia en los muros (Versteeg y Malalasekera, 1995). Yakhot et al. (1991) mejoró el modelo k- ε eliminando las pequeñas escalas de las ecuaciones principales y representando sus efectos en las escalas mayores. Este proceso se denomina como RNG(Re-Normalization Group). Otro método alternativo al k- ε es el k-w propuesto por Wilcox(1988,2008) que introdujo la frecuencia de turbulencia ($w=k/ \varepsilon$) como segunda variable. Menter (1993) sugirió un modelo entre k- ε y k-w. Este último se implementaba en zonas cercanas a los muros, mientras que el primero se utilizaba en la región principal del flujo. Estas modificaciones se incluyeron en el modelo SST k-w.

3.4 MODELOS DE DISCRETIZACIÓN

El tipo de discretización que se utilice en una aproximación numérica afectará directamente en la calidad de la misma. Hoy en día los principales modelos son: diferencias finitas (FD), volúmenes finitos (VF) y elementos finitos (FE).

3.4.1 MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS

Se trata del método más antiguo para solucionar ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Para llevarlo a cabo, se debe generar una malla en la geometría de estudio. En cada punto de la malla se sustituyen ecuaciones diferenciales cambiando derivadas parciales por aproximaciones a los valores nodales de las funciones. De esta manera, obtenemos una ecuación algebraica por nodo, en el cual el valor de la variable en éste y el número de nodos vecinos son las incógnitas.

A fin de obtener aproximaciones de las primeras y las segundas derivadas se desarrollan series de Taylor o ajuste polinómico.

La desventaja principal que presenta el método es su restricción a geometrías simples. Si disponemos de una malla regular es un método efectivo y fácil de llevar a esquemas de mayor orden. No obstante, frente a flujos complejos pueden no cumplirse las ecuaciones de conservación.

3.4.2 MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

Este método consiste en dividir el dominio en un número finito de volúmenes de control (CVs), de manera que se apliquen las ecuaciones de conservación a cada volumen. Se considera un nodo en el centroide de cada CV en el cual se calculan los valores de las variables. Mediante interpolación, es posible expresar los valores de las caras del volumen de control en función de los valores en el nodo. Por lo tanto disponemos de una ecuación algebraica para cada volumen, en el cual aparecen los nodos contiguos.

Este método se puede adaptar a cualquier tipo de malla, siendo por lo tanto el más adecuado para geometrías complejas. No obstante, su principal inconveniente es que para métodos de orden superior a 2 son complejos de desarrollar en 3 dimensiones.

Este es el método utilizado por el software de código libre OpenFOAM®, de manera que se verá en detalle más adelante.

3.4.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En este caso el dominio se descompone en una serie de volúmenes discretos o elementos finitos que están generalmente desestructurados. Su sello distintivo es que las ecuaciones se multiplican por una función de peso antes de ser integradas sobre todo el dominio.

La principal ventaja es la habilidad de encajar geometrías arbitrarias. Los métodos de elementos finitos son relativamente fáciles de analizar matemáticamente. El principal inconveniente es que las matrices de las ecuaciones linealizadas no están tan bien

estructuradas como las que tienen mallas estructuradas haciendo así más complicado encontrar un buen método de cálculo.

3.4.5 CONDICIÓN DE COURANT–FRIEDRICHS–LEWY

Esta condición fue descrita por Richard Courant, Kurt Friedrichs y Hans Lewy en 1928. Se trata de la condición necesaria para que suceda la convergencia al resolver un sistema de ecuaciones diferenciales parciales por el método de diferencias finitas. Es un parámetro que mide la movilidad de la solución y es frecuentemente utilizado en la adaptación del paso del tiempo.

En el caso de una dimensión:

$$C = \frac{u_{x_i} \Delta t}{\Delta x_i} \leq C_{max}$$

Siendo:

u es la magnitud de velocidad (L/T)

Δt es la variación de tiempo (T)

Δx es la longitud del intervalo (L)

Esta condición será junto con la calidad de la malla, la más significativa para que el modelo compute con éxito. El hecho de que no se cumpla la condición de Courant, debido a velocidades demasiado elevadas o intervalos de tiempo excesivamente altos hará que el programa se colapse. Este error es fácilmente identificable observando el código de respuesta de OpenFOAM®, puesto que su indicador principal es el parámetro fase comentado anteriormente. Si el parámetro de fase alcanza valores superiores a la unidad o inferiores a 0, sabemos que la condición de Courant no se estará cumpliendo y se deberán reducir los intervalos de tiempo.

Cabe destacar, que el archivo de control del caso permite aplicar la función *AdjustableTimeStep*, esta función está presente en una gran cantidad de software de hidráulica y mecánica de fluidos la cual reajusta los intervalos de tiempo en función de las velocidades calculadas y las longitudes de celda. No obstante, no es tan precisa como fijarla manualmente ofreciendo en la mayoría de los casos intervalos excesivamente bajos que desfavorecen a una óptima computación en términos de tiempo.

3.5 LA MALLA

La malla es una parte integral de la solución numérica y debe satisfacer ciertos criterios a fin de asegurar una solución válida y precisa.

Por defecto, OpenFOAM® define una malla formada por un conjunto de celdas en 3D, definidas en caras arbitrarias de manera que las celdas pueden tener un número ilimitado de caras, y estas a su vez un número ilimitado de bordes. Una malla definida con esta estructura general se conoce en OpenFOAM® como una *polyMesh* (polimalla). Este tipo de malla ofrece una gran libertad en lo que a generación y manipulación de malla se refiere, sobre todo cuando la geometría es compleja o varía en el tiempo.

3.5.1 MALLA NO ESTRUCTURADA

El caso más sencillo de utilizar para Salome es la generación de una malla no estructurada. Una malla no estructurada. Las mallas no estructuradas son aquellas que parten de distribuciones de puntos que cumplen una serie de propiedades dadas, la mayoría de ellas relacionadas con una distribución lo más uniforme posible dentro del contorno. Suelen ser adecuadas para geometrías irregulares donde es muy difícil generar una malla estructurada.

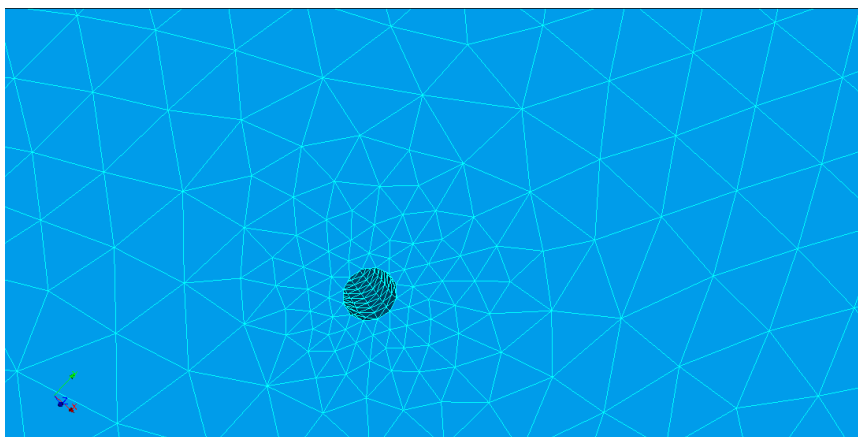


Ilustración 10 Ejemplo de malla no estructurada generada con Salome

Las ventajas de utilizar malla no estructurada se reducen considerablemente si tenemos en cuenta la calidad de la malla. Algunos algoritmos como el refinado automático del número de volúmenes o algoritmos asociados a flujos con propiedades turbulentas pueden llevar al colapso de la computación o a que nuestro modelo no converja una solución única.

3.5.2 MALLA ESTRUCTURADA

Las mallas estructuradas ofrecen ciertas ventajas sobre las no estructuradas, cada vértice de la malla excepto en las fronteras, tiene un vecino isomorfo. Su implementación es simple y muy conveniente para la solución de diferencias finitas, requieren menos memoria de cómputo y ofrecen la posibilidad de controlar directamente la forma y el tamaño de cada elemento. La gran desventaja de este tipo de mallas, es su poca flexibilidad para ajustarse a dominios con geometrías complicadas.

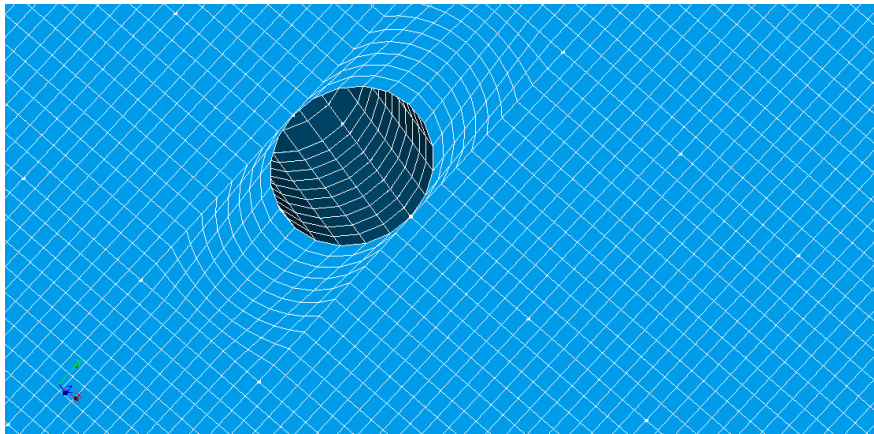


Ilustración 11 Ejemplo de malla estructurada (<http://www.arc.vt.edu/>)

De este modo, el gran reto a enfrentamos en el planteamiento del proyecto será el cómo generar una malla estructurada en una geometría irregular.

3.5.1 BLOCKMESH

El principio en el cual se basa *blockMesh* es en descomponer el dominio en un conjunto de bloques hexaédricos generando una malla estructurada. Las aristas de estos bloques pueden ser líneas rectas, arcos o splines.

LOS PUNTOS

Se definen como localizaciones en un espacio tridimensional, definido por un vector en unidades de metros. Los puntos se agrupan en una lista en la cual cada punto se asocia a un número entero, empezando por cero. Esta lista de puntos no debe contener dos puntos distintos en la misma posición exacta o ningún punto que no sea parte de por lo menos una cara.

LAS CARAS

Las caras son una lista de puntos, en la que utilizamos el número asociado a cada punto. El orden de estos números debe cumplir que dos puntos vecinos estén conectados con la misma línea. Cada cara se agrupa en una lista en la cual nos referimos a cada una de ellas con un número, que representa su posición en la lista.

La dirección del vector normal a la cara se defina con la regla de la mano derecha, como se aprecia en la imagen:

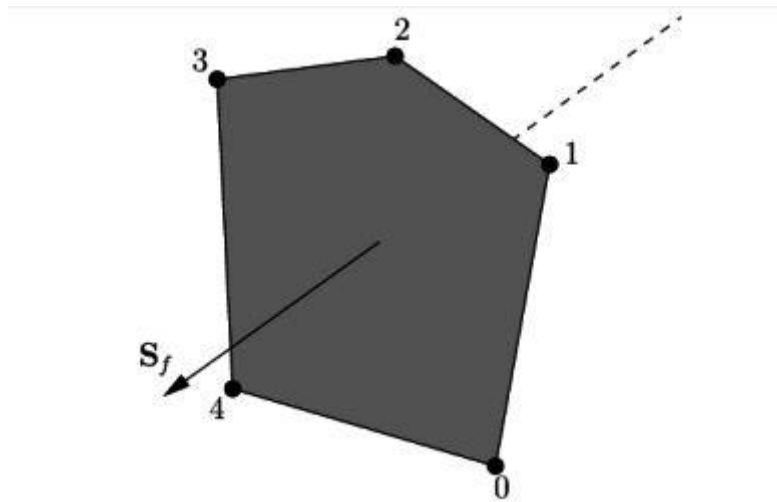


Ilustración 12 Esquema de funcionamiento de caras de OpenFOAM® (<http://www.OpenFOAM®.org/>)

Tenemos dos tipos de caras:

- Caras internas: estas caras que conectan dos celdas(o más). Para cada cara interna, la ordenación de los puntos es tal que la normal apunte a la celda con un número de lista asociado más alto.
- Caras de contorno: Estas pertenecen al contorno de nuestro dominio y por lo tanto están en contacto con una celda y con un parche de contorno. La ordenación de los puntos debe ser tal que la normal apunte hacia afuera del dominio computacional.

LAS CELDAS

- Contiguas: las celdas deben cubrir todo el dominio computacional y no se deben solapar entre ellas.
- Convexas: cada celda debe ser cóncava y su centro debe de estar dentro de la celda.
- Cerradas: deben estar geométricamente (si todos los vectores de superficie apuntan hacia a fuera de la celda, la suma debe ser igual a cero) y topológicamente (todos los bodes en la celda deben compartir exactamente dos caras de la celda) cerradas.
- Ortogonales: para cada cara interna, el ángulo entre el vector de una cara, y el vector de centro a centro debe ser siempre inferior a 90° .

3.5.2 SALOME

Salome es un software de código abierto que da soporte en el pre-proceso y en el post-proceso de una simulación numérica.

Tiene un sistema de generación de mallas muy robusto y muy exigente en cuanto a restricciones geométricas. En adición a esto, soporta la exportación de mallas una vez generadas en formato .UNV. Este formato, es convertible a Foam y provisiona una malla fácil de manejar a la vez de robusta. El funcionamiento de este programa será explicado paso por paso en el apartado de simulación.

4 EXPERIMENTO A SIMULAR

El experimento en el que esta tesina se va a basar será el realizado por la exalumna Elyanne Rodríguez (2007) en el Laboratorio de Morfología Fluvial del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la UPC.

En su tesina, realizó una serie de experimentos a fin de obtener geometrías de foso de erosión para un seguido de pilas circulares de diferentes diámetros con el mismo tipo de sedimento y las mismas condiciones hidráulicas, a fin de encontrar una correlación entre ellos.



Ilustración 13: Canal de laboratorio utilizado en los ensayos. Fotografía de Elyanne Rodríguez.

4.1 CONDICIONES DE LOS ENSAYOS

Para definir las condiciones en las cuales se iban a ejecutar los experimentos, se hizo el estudio de los caudales necesarios para obtener relaciones entre tensión de corte de fondo y tensión crítica cercanas a la unidad.

τ_0 / τ_c	τ_0	So	i	Rh	y (cm)	Q (l/s)	γ
1	0,93	0,001	0.001	0,095	10,27	105,57	9800
0.9	0,84	0,001	0.001	0,085	9,17	87,85	9800
0.91	0,85	0.001	0,001	0,086	9,28	89,55	9800
0.92	0,86	0.001	0,001	0,087	9,39	91,27	9800
0.95	0,88	0.001	0.001	0,090	9,72	96,52	9800

Tabla 1 Cálculo del caudal para pendiente de 0.001 y tensión de corte 0.93 (Tesina de Elyanne Rodríguez, 2007)

Tal y como comenta en su tesis, el ratio entre tensiones se fijó en 0.95: “Finalmente se decidió realizar los ensayos de erosión de pilas con una relación de $\tau_0 / \tau_c = 0.95$, lo que implicaba un caudal de **96.52 l/s**, para una zanja con una pendiente de **0.001**,” (Elyanne Rodríguez, 2007). De esta manera, estas serán las condiciones hidráulicas que se deberán simular en el experimento.

4.2 ELECCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA PILA

Para llevar a cabo los ensayos de laboratorio, Elyanne Rodríguez realizó experimentos para 4 pilas circulares de metacrilato transparente huecas de 4, 5, 6, y 9 cm de diámetro, y 60 cm de altura. Tras alcanzar el punto de equilibrio, se realizaron barridos laser de los fosos de erosión, obteniendo archivos de coordenadas de formato .xyz que posteriormente se trasladaron a Matlab.

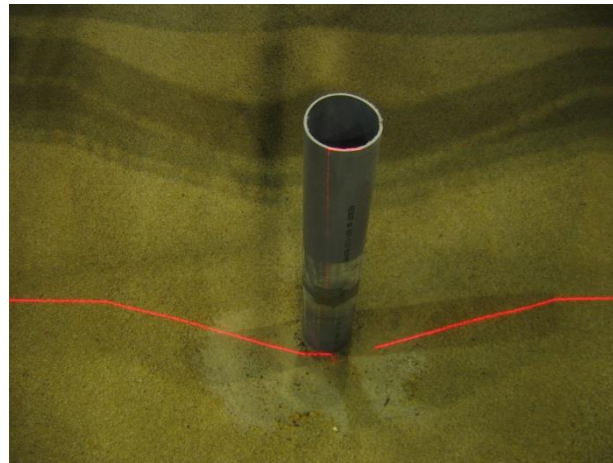


Ilustración 14: Barrido laser registrando la geometría del foso. Fotografía de Elyanne Rodríguez (2007)

Debido a las limitaciones de espacio en los experimentos realizados en el laboratorio, la mayoría de los fosos registrados estaban cortados en la zona de aguas debajo de la pila, de manera que si se hubiera decidido realizar una simulación con estos fosos, los resultados se podrían ver afectados por esta misma limitación geométrica.

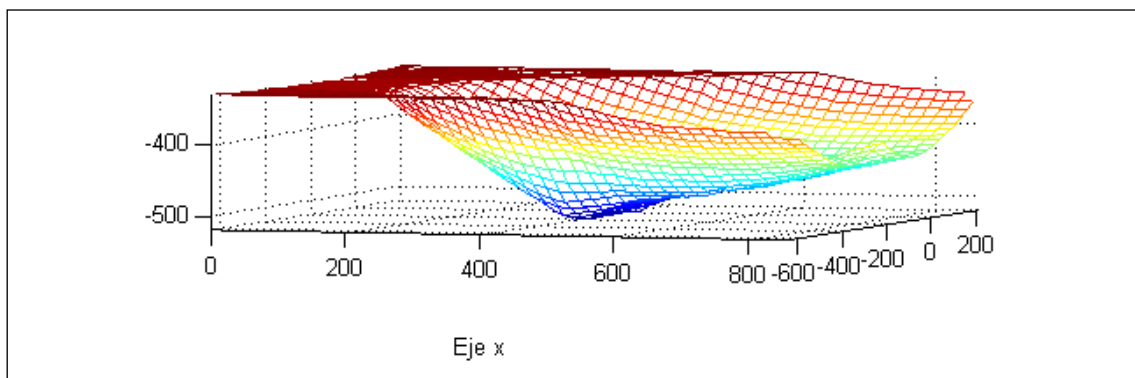


Ilustración 15: Geometría obtenida de la pila de 9 cm. Datos e imagen de Elyan Rodriguez.

De esta manera, la geometría más completa de la que se dispone de estos ensayos es la correspondiente a una pila de un radio de 6 cm de diámetro.

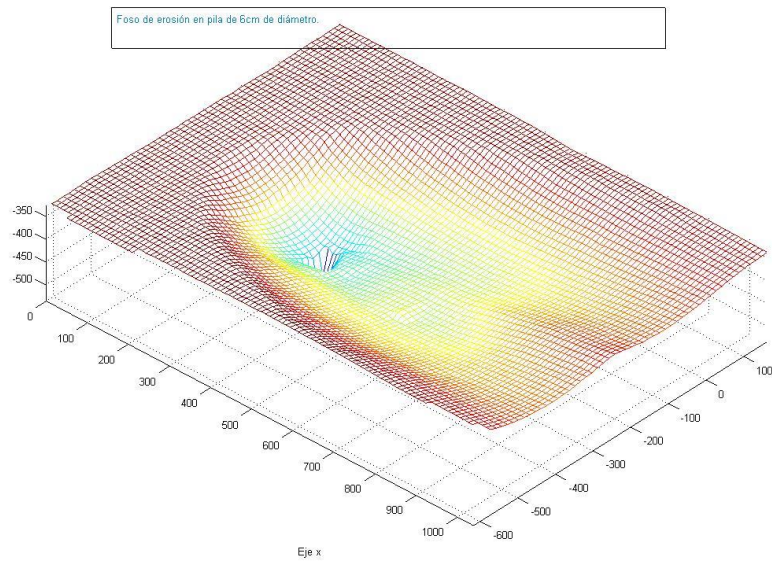


Ilustración 16 Foso de erosión obtenido de la pila de 6 cm de diámetro (datos de Elyan Rodríguez)

A pesar de no estar del todo completa, la batimetría ha sido procesada con las herramientas AutoCad Civil 3D, AutoCad Mechanical y Salome realizando extrusiones de la parte frontal y laterales para expandir la geometría y realizando una transición suave de la parte posterior del foso a fin de definir unas condiciones hidráulicas de salida más sólidas.

5 SIMULACIÓN

Uno de los puntos más importantes que determinaran el éxito o el fracaso de la computación de nuestro modelo es la malla que discretizará nuestra geometría generando un conjunto de volúmenes finitos.

La estructura, la cantidad de volúmenes y la homogeneidad de nuestra malla son los parámetros clave que deberán regir nuestra malla por encima del resto.

5.1 GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA

El punto de partida en nuestro análisis numérico son los puntos de la geometría del foso obtenidos por Elián Rodríguez en sus experimentos del 2007. De manera que la primera conversión que debemos ejecutar será transformar nuestros puntos en una superficie que pase por cada uno de ellos en formato .stp (el formato capaz de importar Salome).

Autocad Mechanical 3D es una herramienta de diseño 3D capaz de exportarnos volúmenes y superficies en el formato .stp.

Disponiendo del listado de coordenadas que caracterizan el foso, procedemos a importarlas al en la ventana de comandos de Autocad Mechanical 3D.

[--][Vista personalizada][Estructura alámbrica 2D]



Ilustración 17 Puntos visualizados mediante AutoCad 2014

Tal y como podemos apreciar en la imagen, la calidad y la precisión de los datos del experimento de Elián Rodríguez nos aseguran un lecho realista y acorde con la realidad.

El siguiente paso consiste en la generación de una superficie ajustada a estas coordenadas que nos permita convertir la nube de puntos en una geometría sólida con la que poder trabajar sin perder la credibilidad de los datos originales. Para conseguirlo, el método seleccionado será unir los puntos en una sola dirección, generando Splines que a posteriori guiarán la extrusión de la superficie.

[-][Vista personalizada][Estructura alámbrica 2D]

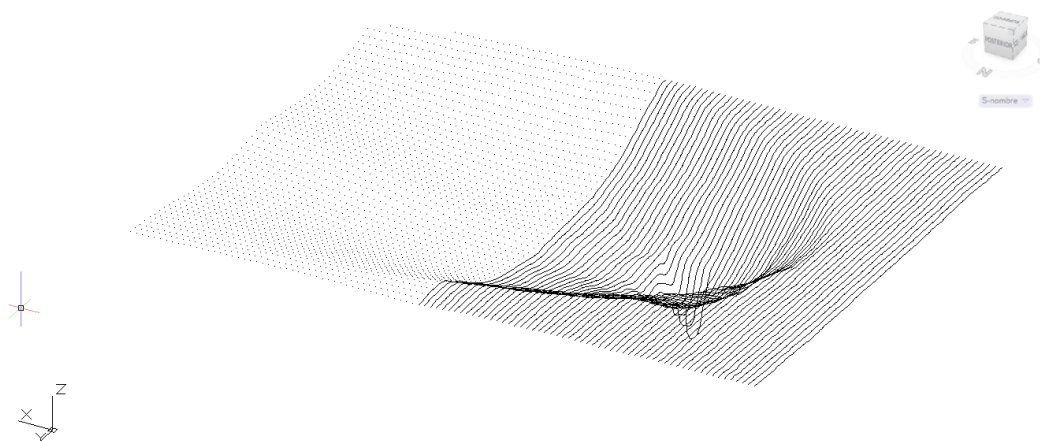


Ilustración 18 Generación de las splines

Ejecutando la función Loft de Autocad, podremos generar la superficie del lecho haciendo que coincida por todas las Splines generadas seleccionándolas en el orden adecuado. Es muy importante generar la superficie con una sola función Loft, dado que si extruímos la superficie por tramos y los unimos a posteriori, se nos generaran aristas innecesarias que entorpecerán posteriormente la generación del mallado. El objetivo es conseguir la superficie y los volúmenes con el menor número de aristas posibles.

La función Loft de Autocad requiere de mucha capacidad de hardware del equipo que se esté utilizando, de modo que un PC de gama media con un procesador de 2.5GHz puede tardar entre 5 y 10 minutos en añadir las últimas Splines a la superficie en cuestión.

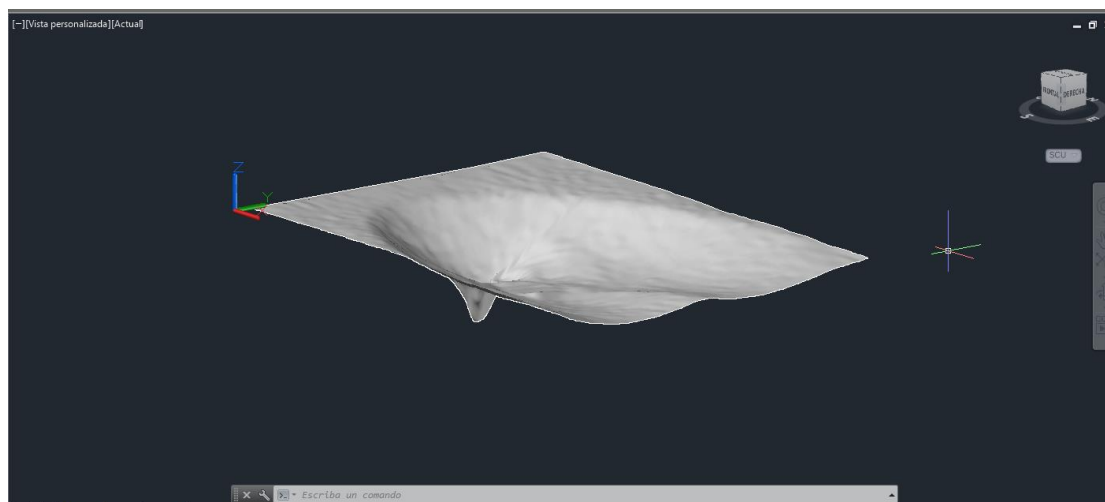


Ilustración 19 Superficie generada mediante la función loft

Como se puede apreciar en la imagen el resultado es una superficie suave que se ajusta al modelo inicial constituido únicamente por nodos.

Para generar el volumen de control dentro del cual generaremos la malla y aplicaremos los algoritmos adecuados tenemos dos posibilidades. La primera opción es extruir directamente la superficie, en la dirección del eje Z. Tal y como se aprecia en la figura, el volumen generado dispone de superficie inferior y superior homólogas y paralelas. Esta característica nos facilita una posterior generación de malla con métodos basados extrusión de superficies.

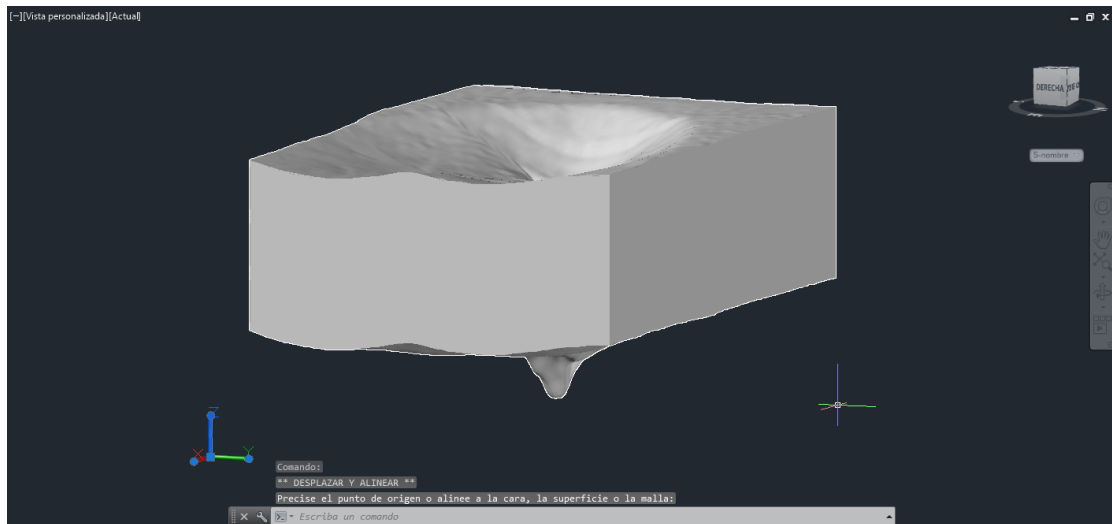


Ilustración 20 Volumen generado por extrusión

No obstante, el mero hecho de tener dos superficies irregulares en vez de una sola, hace que manipular el volumen con Autocad y posteriormente con Salome sea un proceso de alto coste computacional y se requiera de unas especificaciones técnicas muy exigentes, sobre todo para la tarjeta gráfica y el procesador del equipo.

Teniendo en cuenta estos factores, se decide esculpir un prisma rectangular generado por Autocad con el foso de erosión generado. De esta manera solo disponemos de una superficie irregular, definiendo la parte superior como un rectángulo y sacrificando la naturaleza extruida del caso anterior.

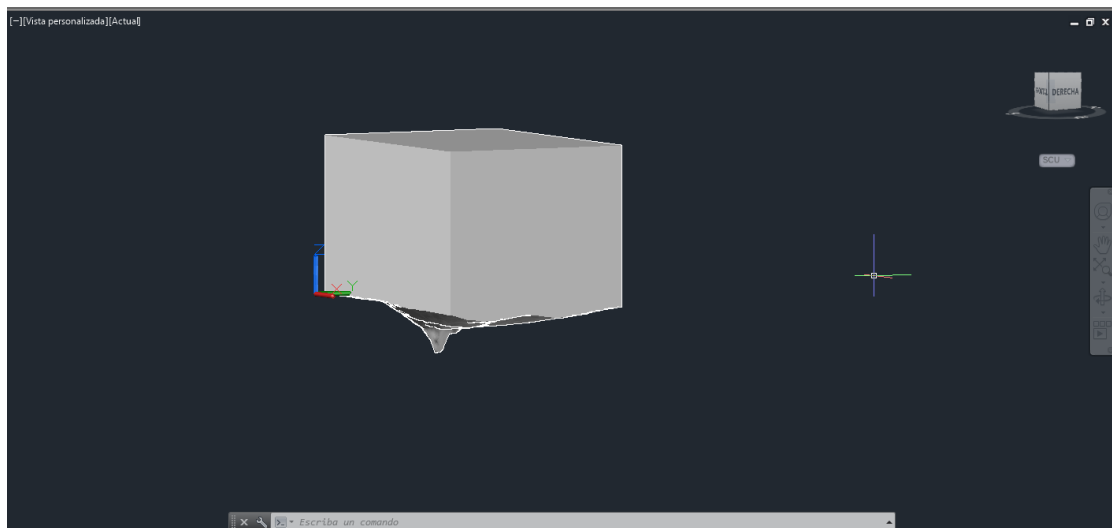


Ilustración 21 Volumen generado esculpido

5.2 GENERACIÓN DE LA MALLA

Tal y como hemos mencionado con anterioridad, el software para la generación de malla es Salome, que nos permite importar geometrías complejas y manipularlas a fin de obtener mallas.

El primer paso se basa en la importación de la geometría en formato .stp. En este caso, basta con hacer uso de la función importar de Salome y seleccionar la geometría generada con Autocad Mechanical.

Una vez hemos importado el archivo procedemos a añadir la pila del puente. La mejor opción en este caso será realizar una perforación en nuestra geometría, en la posición en la que la pila se encontraba en los experimentos.

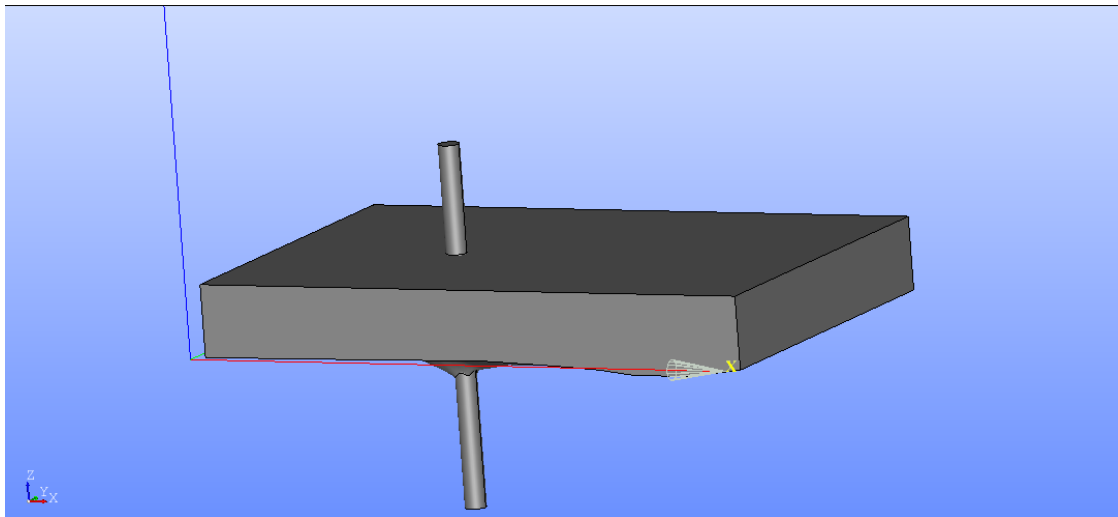


Ilustración 22 Perforación del volumen de control mediante Salome

Este método ha sido seleccionado no solo por su facilidad de aplicación, sino también porque podemos prescindir de un mallado en el interior de la pila en el cuál no vamos a tener paso de fluido y ni necesidad de aplicar ningún algoritmo de cálculo.

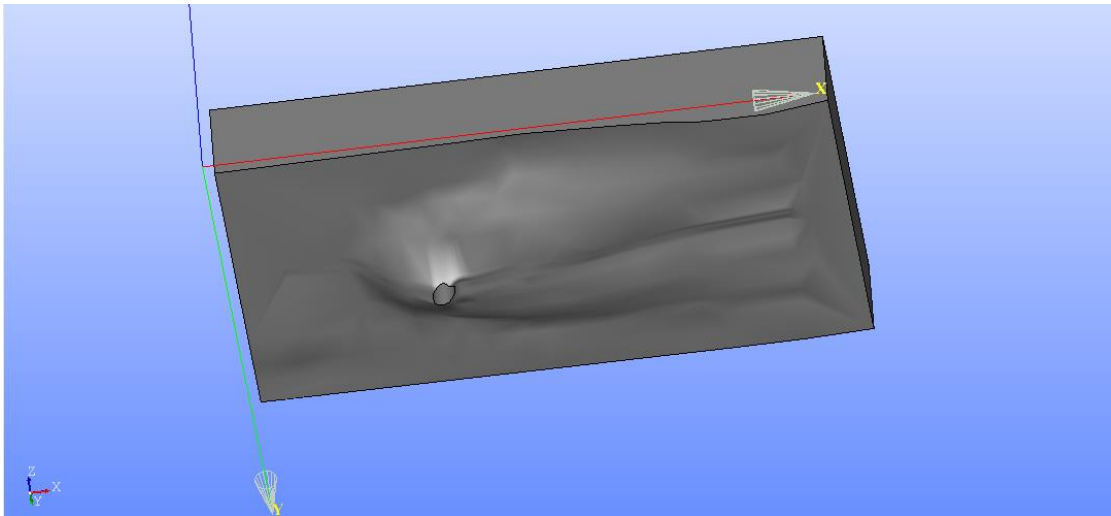


Ilustración 23 Volumen perforado por el cilindro pilar

Tal y como podemos observar en la imagen, la perforación aplicada sobre la geometría nos genera por defecto una arista longitudinal en el sentido del cilindro interior. De esta manera se nos ha añadido una arista nueva en la geometría que deberá incluirse en la malla y nos afecta directamente sobre la generación de la misma.

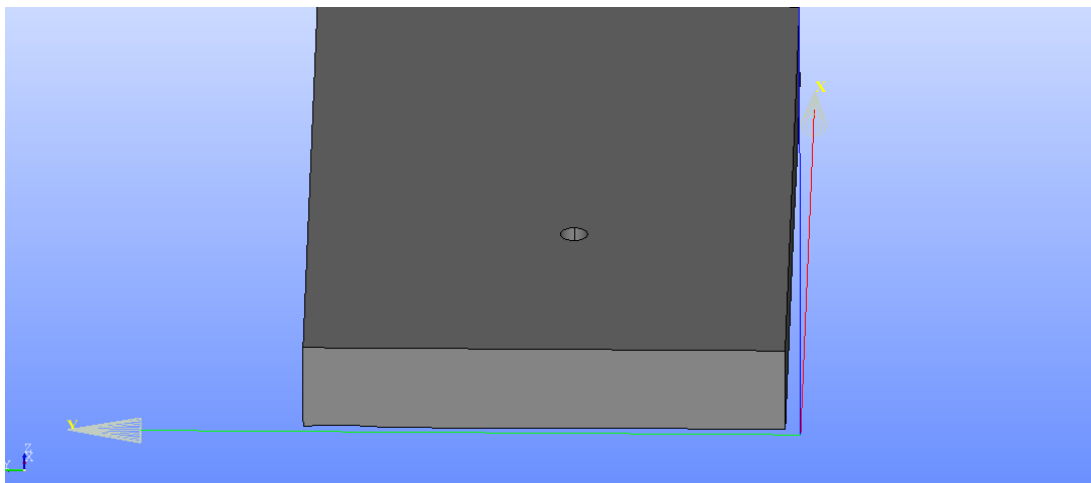


Ilustración 24 Vista frontal del volumen de control

Salome puede generar una malla en cualquier tipo de geometría cerrada siempre y cuando se garantice la hipótesis de continuidad. Esta nueva arista generada no cumple las condiciones que fija el software para la generación de malla y si intentamos generarla directamente, obtendremos un mensaje de error advirtiéndolo sobre la no continuidad de la geometría.

Cualquier arista que forme nuestra geometría en Salome no puede desaparecer al cambiar de plano. De esta manera, se puede solucionar el problema realizando un corte con un plano que contenga la arista en cuestión y garantice su continuidad a lo largo de todos los planos con los que interseca.

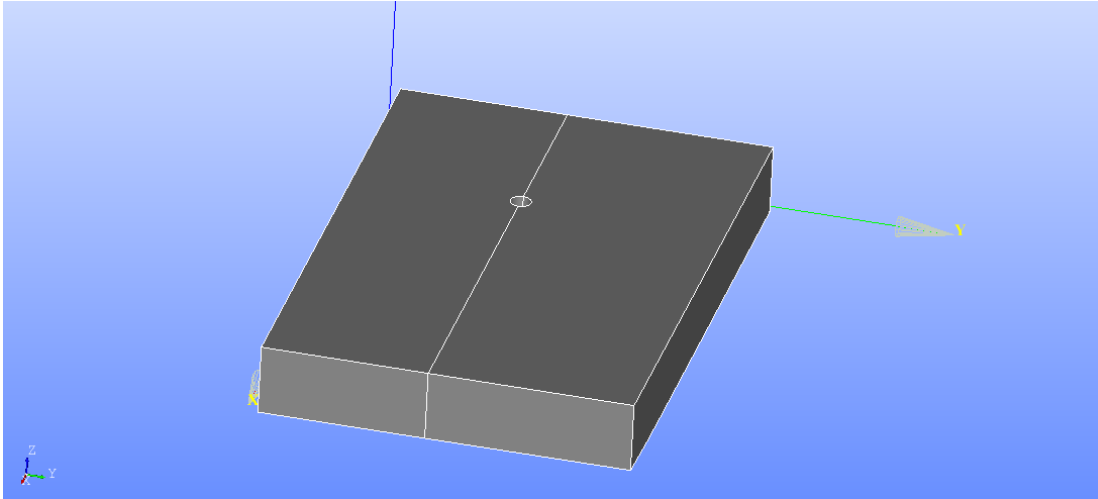


Ilustración 25 Vista posterior del volumen cortado

Una vez garantizada la continuidad de nuestro volumen, se debe tomar la decisión de generar una malla estructurada o una malla no estructurada.

5.2.1 MALLA NO ESTRUCTURADA

La función aplicada más rápida y sencilla que podemos utilizar para generar una malla no estructurada es el algoritmo Netgen (2D,3D,1D).

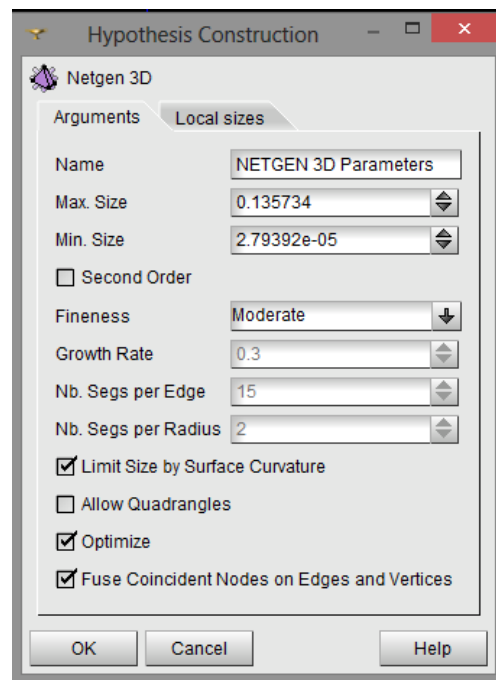


Ilustración 26 Parámetros de generación de malla no estructurada

Esta hipótesis nos genera una malla triangular en 2 dimensiones y tetraédrica en 3D. Los únicos parámetros que podemos definir en esta función son la uniformidad de los volúmenes generados y los tamaños máximo y mínimo que vamos a permitir.

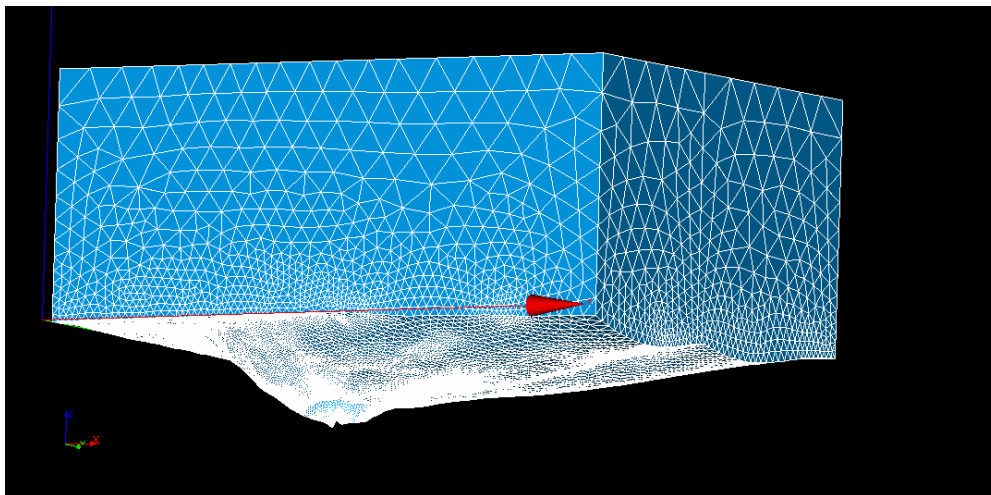


Ilustración 27 Malla no estructurada del volumen de control

Es una función potente, rápida y muy fácil de utilizar. Sin embargo, podemos tener problemas de convergencia en cálculos que implementen modelos de turbulencia.

5.2.2 MALLA ESTRUCTURADA

La opción adecuada y más recomendable de malla a calcular en OpenFOAM® es una malla estructurada. Hay más de una opción para generar esta categoría de mallas con Salome, Extrusión 3D, Proyección de mallas bidimensionales, etc. Sin embargo, tras realizar varias pruebas la más eficaz y a la vez la más robusta es la hipótesis Hexa_3D. Con esta función generaremos mallas basadas con hexaedros como elementos unitarios, garantizando así las ventajas características de las mallas estructuradas. Sin embargo, se deben de cumplir un requisito determinante a la hora de generar una malla hexaédrica. La geometría debe estar formada por volúmenes de 6 caras, y todas las caras deben tener 4 aristas. Como podemos observar en la figura inferior, tanto en la parte superior como en la inferior disponemos de 5 caras.

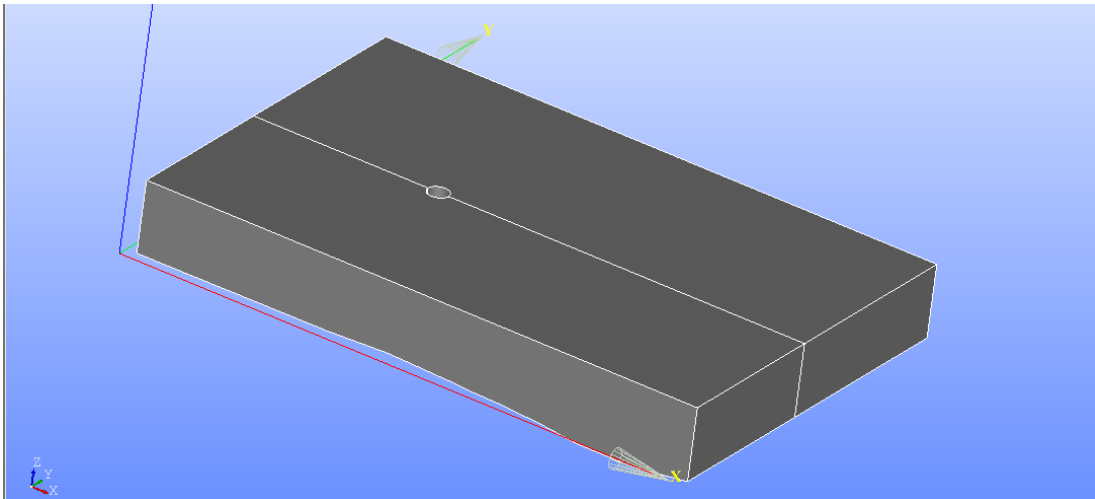


Ilustración 28 Vista en planta del volumen de control

De esta manera, debemos realizar una serie de particiones para que todas los subconjuntos geométricos de nuestro foso cumplan los requisitos solicitados.

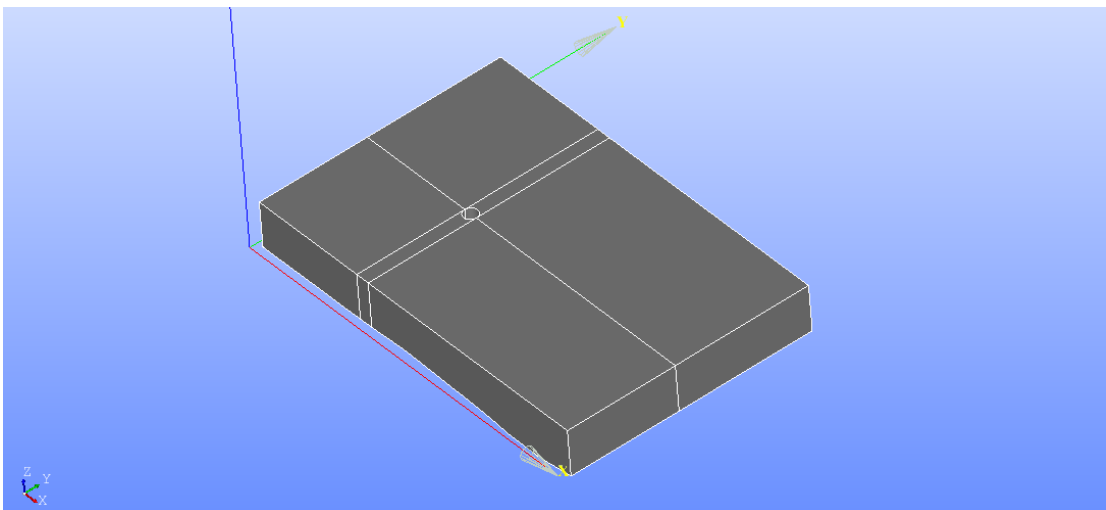


Ilustración 29 Vista del volumen de control tras dividirlo en hexaedros

Realizando dos particionales tangenciales al prisma y transversales al primer corte de continuidad, conseguimos que todas nuestras caras dispongan de 4 aristas y los volúmenes se basen en formas hexaédricas.

Llegados a este punto, se inicia el proceso de mallado seleccionando la hipótesis tridimensional de Hexahedron (i,j,k).

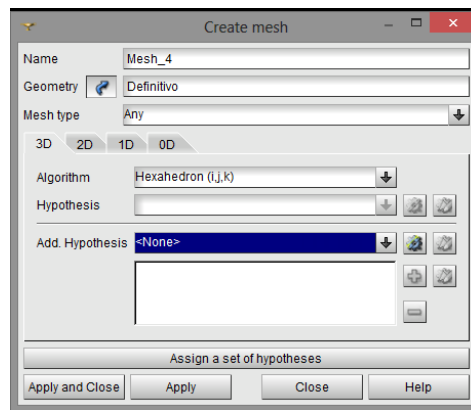


Ilustración 30 Selección de algoritmo de mallado

Esta hipótesis de mallado es algo más compleja que la que se ha visto en casos anteriores, de manera que deberemos dividir el problema en distintas hipótesis para 1 y 2 dimensiones por separado. Una vez fijada la opción tridimensional, disponemos de una pestaña en la cual podemos seleccionar las hipótesis de mallado bidimensional. Dado que nuestra prioridad es generar una malla estructurada, seleccionamos el algoritmo de Mapeado Cuadrangular, al cual fijamos la hipótesis de Preferencia Cuadrangular. Ésta nos garantiza una estructura cuadrática cuando la malla se aproxima a zonas donde la geometría presente variaciones bruscas o irregulares.

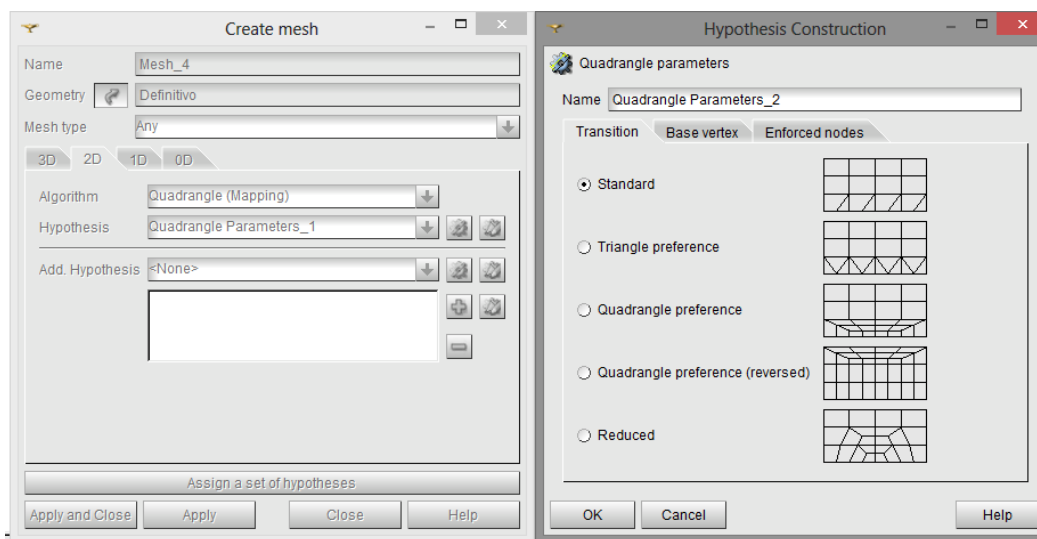


Ilustración 31 Selección de las hipótesis bidimensionales

Finalmente, disponemos de un último menú focalizado en las hipótesis y algoritmos unidimensionales. La opción escogida se basa en la discretización de las aristas que forman nuestra geometría (Wire Discretisation). Para definirla, se debe determinar en cuantos segmentos queremos dividir las aristas, esto se consigue mediante la hipótesis 'Nb. Segments' que nos preguntará el número en cuestión.

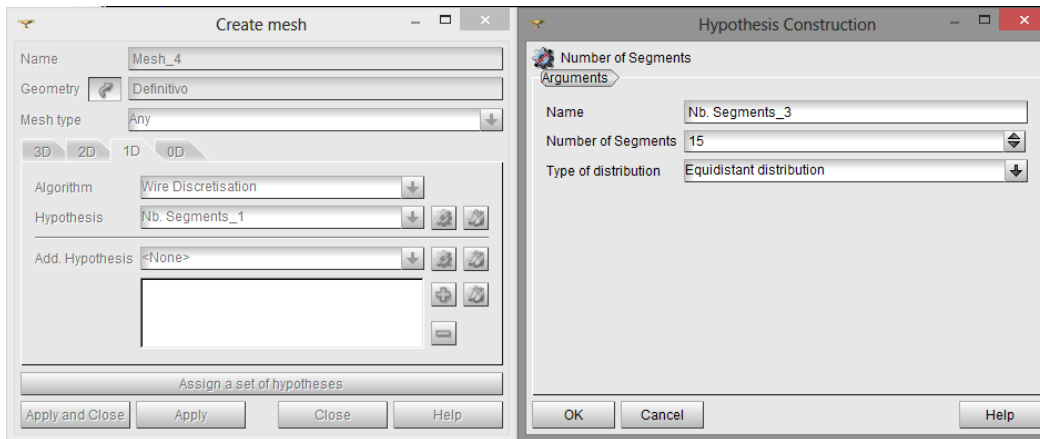


Ilustración 32 Selección de las hipótesis unidimensionales

Este paso es altamente determinante para el éxito de nuestra simulación, dado que indirectamente estamos definiendo el número de volúmenes que formaran nuestra malla.

A fin de conservar la continuidad de la malla y garantizar la estabilidad de futuros cálculos sobre sus elementos todas las aristas de la geometría están sometidas a las mismas hipótesis tanto bidimensionales como unidimensionales. Este hecho, hace que los volúmenes que componen la malla varíen de tamaño dependiendo de la zona en la que se encuentran, lo cual desembocaría en ciertos comportamientos poco realistas del fluido.

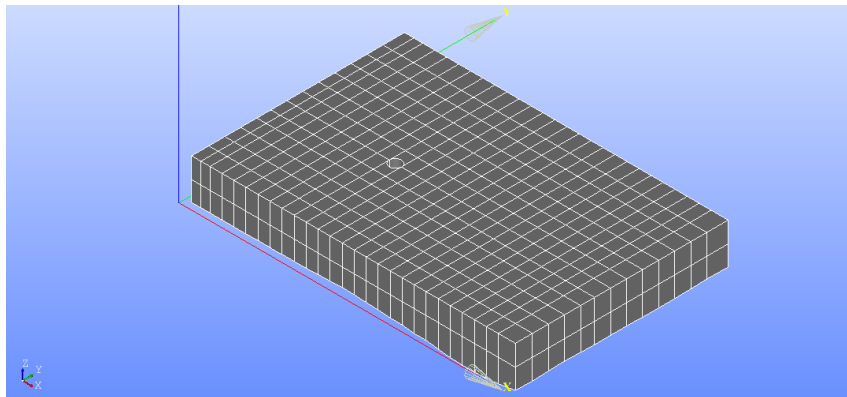


Ilustración 33 Vista superior de la geometría subdividida en hexaedros

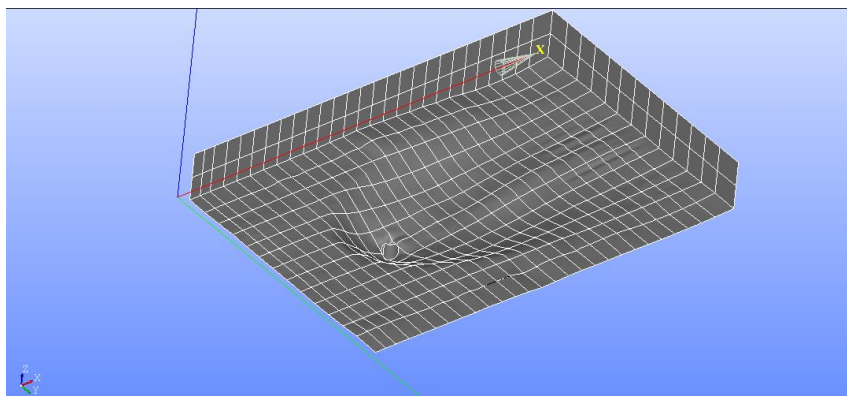


Ilustración 34 Vista inferior de la geometría subdividida en hexaedros

5.2.3 CREACIÓN DE GRUPOS

Una vez hemos adaptado nuestra geometría a los requisitos de mallado, antes de ejecutar los algoritmos correspondientes, se deben asignar los nombres de los parches o muros a los cuales asignaremos las condiciones de contorno posteriormente.

Salome dispone de una opción de agrupación de caras de la geometría de estudio. Utilizando esta función se generan el siguiente listado de grupos:

leftWall	Parche izquierdo, sobre el inlet
inlet	Parche en el que introduciremos la entrada de agua posteriormente
atmosphere	Condiciones atmosféricas
obstacle	Pila del puente
outletair	Parche en el que permitimos la salida de aire
outletwater	Parque en el que permitimos la salida del agua
frontWall	Muro frontal
backWall	Muro trasero

Tabla 2 Parches y muros del volumen de control

En la siguiente imagen podemos ver una captura de como añadimos ciertas caras a un grupo manualmente mediante la función Create Group:

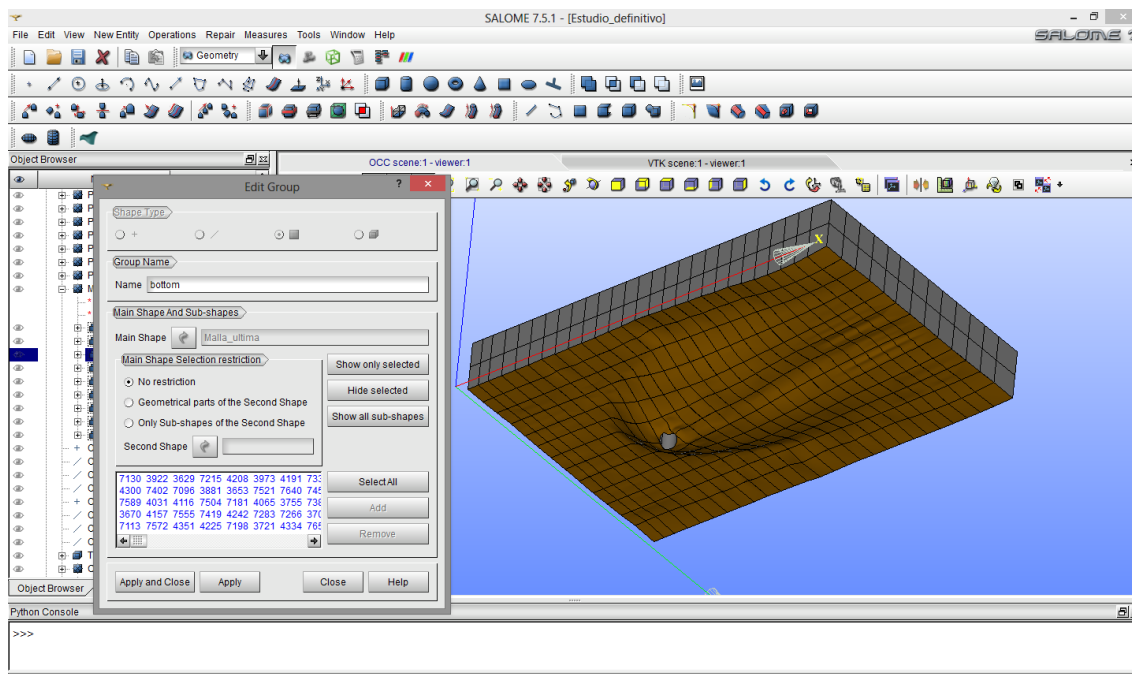


Ilustración 35 Creación de grupos de parches en el volumen de control

5.1 FLUJO LAMINAR

A fin de aclimatarse al funcionamiento del programa y entender el funcionamiento de este se ha desarrollado una simulación de flujo laminar, puesto que los tiempos de cálculo son menores y el *solver* es menos exigente con la calidad de la malla. Es importante saber que estos resultados obtenidos no tienen validez física, puesto que las condiciones de no turbulencia y la imposibilidad de poder asignar una rugosidad al lecho de nuestro canal, hacen que se desarrollen situaciones poco realistas que poco tienen que ver con el comportamiento real que tendría el fluido en una situación parecida.

5.1.1 CONDICIONES DE CONTORNO APLICADAS

En primer lugar se han determinado las condiciones de contorno de la velocidad, teniendo en cuenta que para mantener los caudales unitarios del experimento ésta debe ser del orden de los 40cm/s.

En las condiciones de contorno de presión, se han caracterizado todos los muros con la función *buoyantPressure* y el *outlet* con condiciones atmosféricas. De esta manera se permite la salida de fluido por el parche en cuestión, dado que si las condiciones de velocidad no asignan ninguna velocidad de salida y existe una presión en el muro, el líquido queda retenido en el volumen de control.

De esta manera las condiciones de contorno de velocidad son las que siguen:

```
/*-----* C++ *-----*\
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM®: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / Operation | Version: 2.1.1 |
| \ / And | Web: www.OpenFOAM®.org |
| \ Manipulation |
|*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volVectorField;
    location "0";
    object U;
}
// *****//

dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    leftWall
    {
        type fixedValue;
        value uniform (0 0 0);
    }
    bottom
    {
        type fixedValue;
        value uniform (0 0 0);
    }
}
```

```

frontWall
{
    type      fixedValue;
    value     uniform (0 0 0);
}

atmosphere
{
    type      pressureInletOutletVelocity;
    value     uniform (0 0 0);
}
inlet
{
    type      fixedValue;
    value     uniform (0.4 0 0);
}

outletair
{
    type      pressureInletOutletVelocity;
    value     uniform (0 0 0);
}
outletwater
{
    type      pressureInletOutletVelocity;
    value     uniform (0 0 0);
}
obstacle
{
    type      fixedValue;
    value     uniform (0 0 0);
}
backWall
{
    type      fixedValue;
    value     uniform (0 0 0);
}

defaultFaces
{
    type      empty;
}
}

// ***** //

```

En cuanto a las condiciones iniciales de presión el código se muestra a continuación:

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM®: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / Operation | Version: 2.1.1 |
| \ / And | Web: www.OpenFOAM®.org |
| \ Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{

```

```

    version    2.0;
    format     ascii;
    class      volScalarField;
    object     p_rgh;
}
// *****//

dimensions    [1 -1 -2 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
    leftWall
    {
        type      buoyantPressure;
        value      uniform 0;
    }

    frontWall
    {
        type      buoyantPressure;
        value      uniform 0;
    }

    backWall
    {
        type      buoyantPressure;
        value      uniform 0;
    }

    bottom
    {
        type      buoyantPressure;
        value      uniform 0;
    }

    inlet
    {
        type      buoyantPressure;
        value      uniform 0;
    }

    outletair
    {
        type      totalPressure;
        p0        uniform 0;
        U          U;
        phi        phi;
        rho        rho;
        psi        none;
        gamma      1;
        value      uniform 0;
    }
    outletwater
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

```

```

atmosphere
{
    type        totalPressure;
    p0          uniform 0;
    U           U;
    phi         phi;
    rho         rho;
    psi         none;
    gamma       1;
    value       uniform 0;
}

defaultFaces
{
    type        empty;
}
}

// ***** //

```

Tras alcanzar el punto de equilibrio de la simulación el aspecto del fluido y su comportamiento se aprecia en la imagen que sigue a continuación:

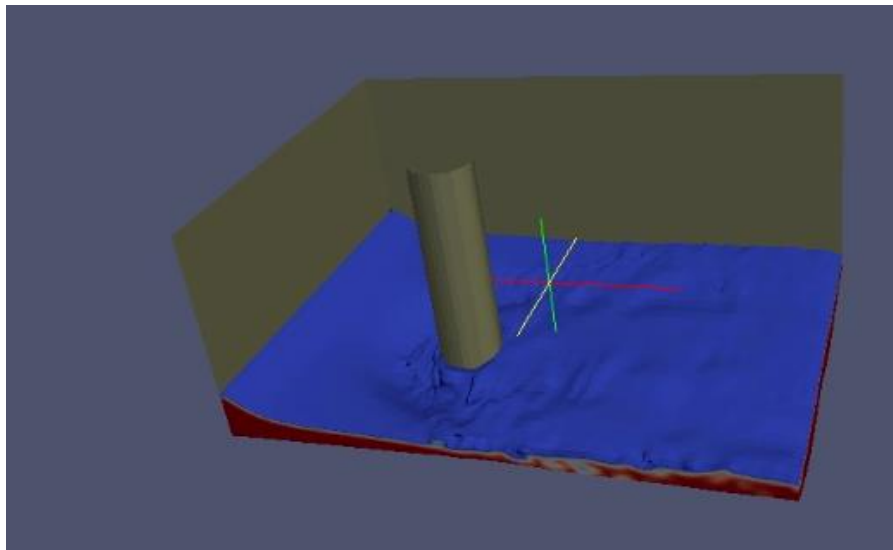


Ilustración 36 Simulación de flujo laminar con condiciones de salida atmosféricas

Tal y como se observa en las imágenes de la simulación realizada, el flujo se acelera en gran medida al introducirse en el volumen de control. En la parte izquierda de la imagen adjunta se puede apreciar como el flujo entra en estado crítico adquiriendo así una gran velocidad a través del volumen similar a la situación de un río que alcanza el precipicio de una cascada.

A la luz de los resultados obtenidos se considera que la velocidad en la salida del canal debería estar fijada para evitar aceleraciones en el outlet y la presión determinada como *zeroGradient* definiendo el gradiente de presiones en dirección a la normal del parche sea igual a 0. Por consiguiente, las condiciones de presión de salida del outlet se modificaron de la siguiente manera:


```

outletwater
{
    type      zeroGradient;
}

```

Y se fijaron las condiciones de velocidad como:

```

inlet
{
    type      fixedValue;
    value     uniform (0.4 0 0);
}

```

Corriendo el programa para estos datos la simulación obtenida es de la siguiente manera:

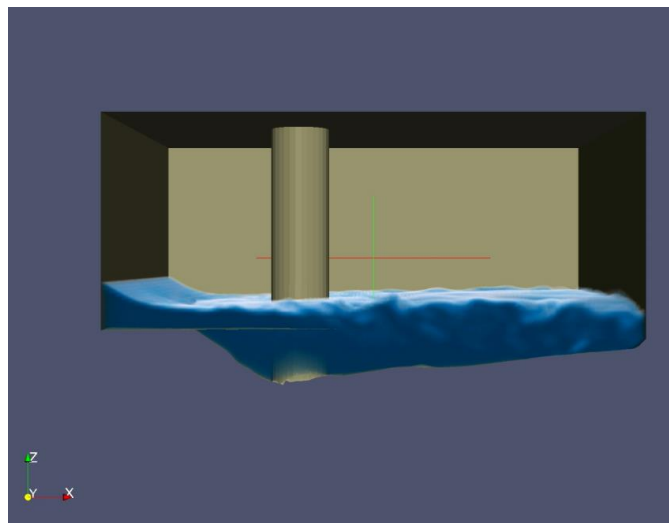


Ilustración 37 Simulación de flujo laminar fijando velocidad de salida y presión con gradiente igual a 0 (perfil)

A pesar de que los resultados presentan un calado más uniforme, el flujo no se llega a estabilizar y continúa entrando en crítico en la zona de entrada del flujo. En adición a esto, en el tramo aguas debajo de la pila el flujo se frena repentinamente para cumplir las condiciones de velocidad de salida generando una serie de vórtices y estados alta inestabilidad del flujo.

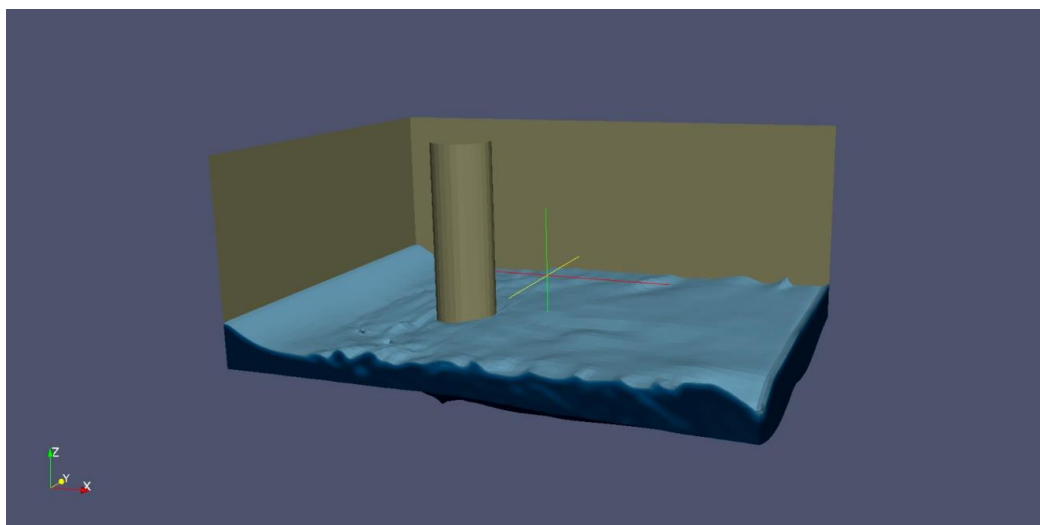


Ilustración 38 Simulación de flujo laminar fijando velocidad de salida y presión con gradiente igual a 0

De esta manera, a fin de evitar la situación crítica en la zona de entrada de flujo, se debe disponer de un sistema que asigne valores de rugosidad. Con esto conseguiremos frenar el flujo y desarrollar un perfil logarítmico de velocidades acorde con las condiciones del experimento.

5.2 FLUJO TURBULENTO RANS

Tras haber decidido el tipo de *solver* que vamos a utilizar en la simulación, debemos proceder a calibrar los parámetros de la simulación, a fin de alcanzar la máxima credibilidad y validez física posible.

El objetivo de esta parte de la tesina será lograr el perfil de velocidad logarítmico del flujo estabilizado justo antes de que el cauce alcance el foso. De este modo, se podrá proceder a determinar las presiones en el foso de erosión de la pila.

Dado que no es posible asignar unas condiciones de contorno tan precisas que nos e vean afectadas con su posterior interacción con el aire, los muros y el foso, se ha decidido extruir 40 cm la parte frontal del flujo. De esta manera se otorga al flujo un margen extra para que se estabilice y alcance un perfil de velocidades y de tensiones estabilizado antes de alcanzar la zona crítica del foso.

Es importante tener en cuenta que el hecho de agrandar nuestro volumen de control se traduce en un incremento del número de volúmenes finitos. Es por este motivo, que no se ha querido incrementar la longitud de este tramo si no es imprescindible para la calidad de los resultados de la simulación.

5.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

5.3.1 ENTRADA DE FLUJO EN PISTÓN

En una primera aproximación, se procederá a fijar las condiciones de entrada y de salida de fluido con una velocidad en pistón de 40cm/s tal y como se realizó en los últimos ensayos de flujo laminar.

A fin de calibrar esta tipología de simulación, el parámetro crítico será el coeficiente de rugosidad K_s , este coeficiente, viene definido, en metros, el tamaño de grano medio del lecho del foso. A pesar de que se trata de arena y que el coeficiente de rugosidad debería ser $K_s=0.0017m$, se han realizado una serie de simulaciones para rugosidades de distintos órdenes de magnitud a fin de averiguar a qué situación converge el perfil de velocidades.

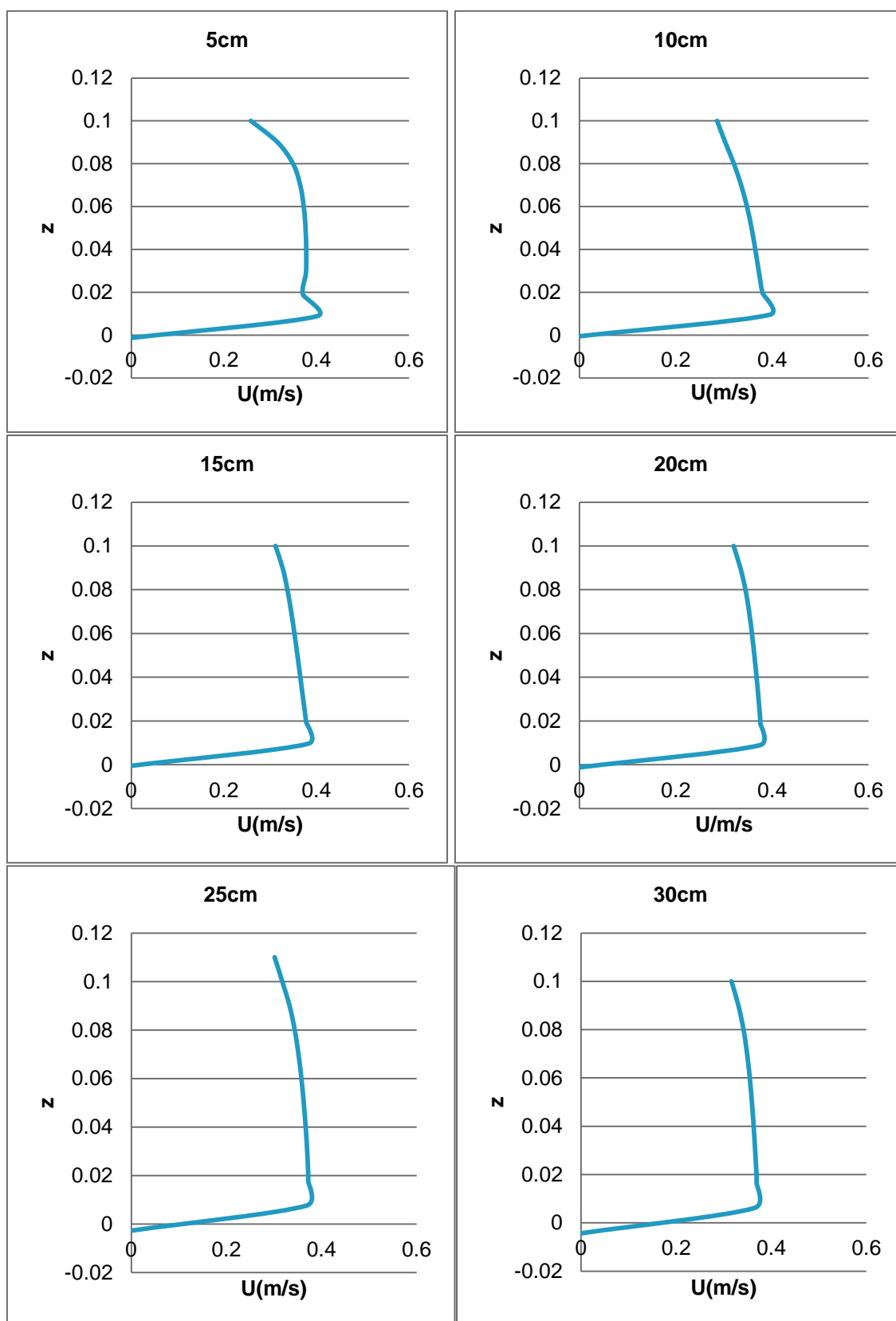
RUGOSIDAD FIJADA EN $KS=0.00005$ 

Ilustración 39 Gráficas de la evolución espacial de los perfiles de velocidades en el tramo inicial de la geometría

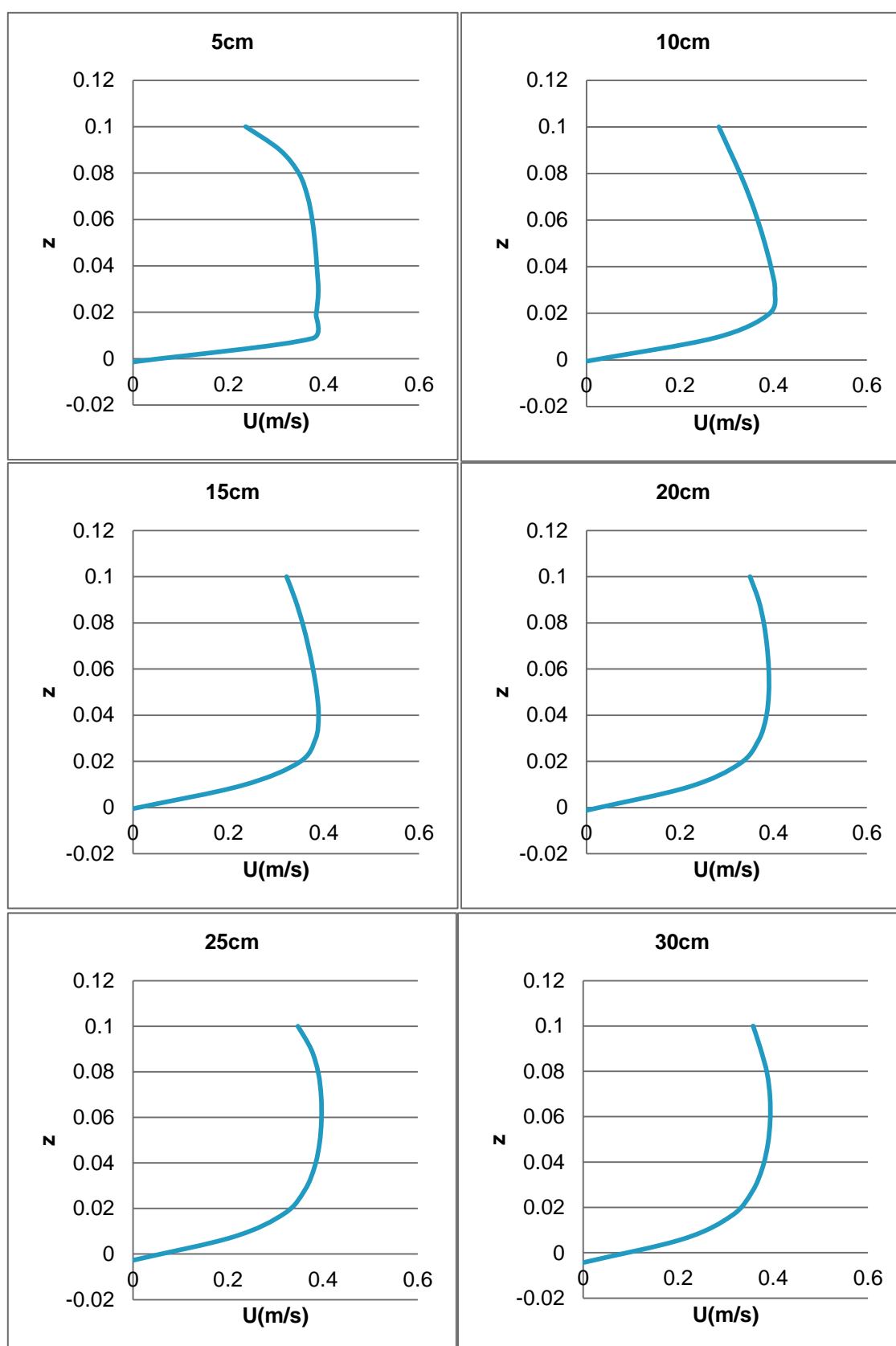
RUGOSIDAD FIJADA EN $KS=0.05$ 

Ilustración 40 Gráficas de la evolución espacial de los perfiles de velocidades en el tramo inicial de la geometría

Repitiendo las simulaciones para los casos de órdenes de magnitud intermedios, se ha obtenido qué perfil de velocidades adaptan los flujos 10 cm antes de alcanzar el foso. La comparativa de todos los perfiles de velocidades asociados a sus respectivas rugosidades son los que siguen a continuación:

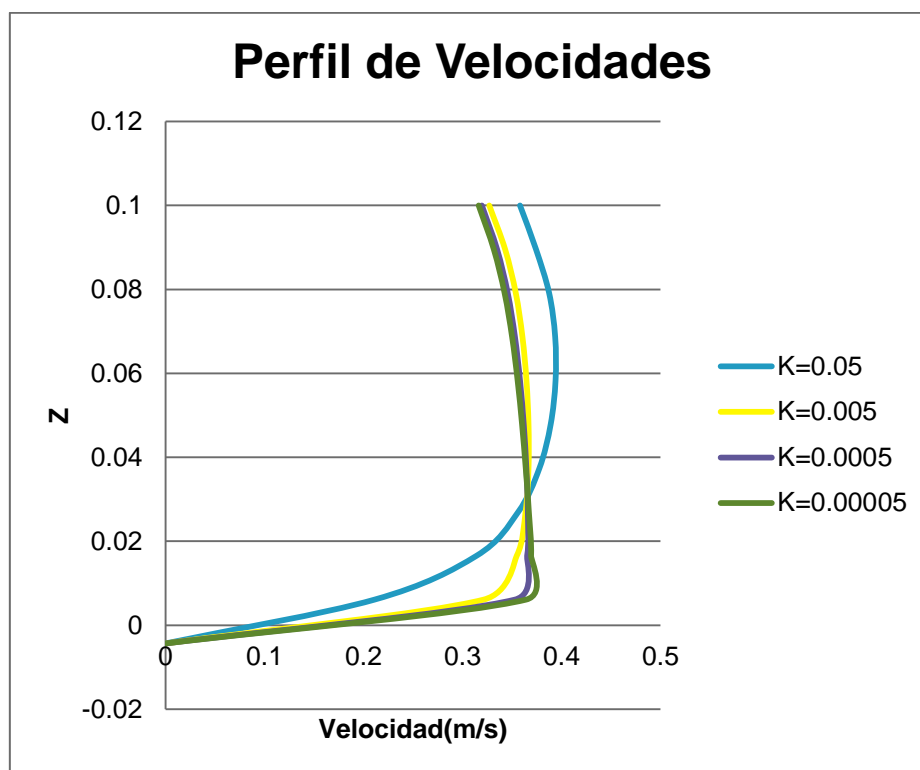


Ilustración 41 Afectación de los valores de la rugosidad al perfil de velocidades

Tal y como podemos observar, el perfil de velocidades pivota alrededor de la capa límite del fluido. Se han obtenido mayores velocidades en la capa viscosa del flujo para rugosidades más bajas y de manera inversa en la zona turbulenta del perfil.

En la zona turbulenta se aprecia una disminución de la velocidad debido a las tensiones de la interfase en el momento en el que la lámina libre del flujo entra en contacto con el aire. En adición a esto, la longitud no es suficiente para desarrollar la turbulencia en su totalidad y obtener el perfil de velocidades deseado, dado que la turbulencia que genera la rugosidad del fluido asciende con la tangente de 6 grados sexagesimales, de manera que necesitaríamos más de 2 metros para que la turbulencia se desarrollase en su totalidad y el perfil de velocidades fuese estable.

5.3.2 ENTRADA DE FLUJO MEDIANTE APLICACIÓN GROOVYBC

Esta aplicación nos permite introducir en las condiciones de contorno funciones que dependan de ciertos parámetros. De esta manera, podemos asignar un perfil de velocidades logarítmico a fin de reducir la distancia de adaptación del mismo a las condiciones impuestas.

$$u(z) = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{30z}{K_s}\right)$$

Siendo:

$K=0.41$

$K_s=0.0017$ (1.7 mm)

Introduciendo esta misma fórmula al código del archivo de velocidades en las condiciones de contorno:

```
/*-----* C++ *-----*\
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM®: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / Operation | Version: 2.1.1 |
| \ / And | Web: www.OpenFOAM®.org |
| \ Manipulation |
|-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volVectorField;
    location "0";
    object U;
}
// *****//

dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    leftWall
    {
        type fixedValue;
        value uniform (0 0 0);
    }
    bottom
    {
        type fixedValue;
        value uniform (0 0 0);
    }
    frontWall
    {
        type fixedValue;
        value uniform (0 0 0);
    }
    atmosphere
    {

```

```

    type      pressureInletOutletVelocity;
    value      uniform (0 0 0);
}
inlet
{
    type      groovyBC;
    variables
        "u_f=0.0308;z0=0.0000566;Ka=0.41;vel=(u_f/Ka)*log((pos().z+0.001)/z0)*normal()";
    valueExpression "-vel";
    value      uniform (0 0 0);
}

outletair
{
    type      fixedValue;
    value      uniform (0 0 0);
}
outletwater
{
    type      fixedValue;
    value      uniform (0.18 0 0);
}
obstacle
{
    type      fixedValue;
    value      uniform (0 0 0);
}
backWall
{
    type      fixedValue;
    value      uniform (0 0 0);
}

defaultFaces
{
    type      empty;
}
}

// ***** //

```

Análogamente, podemos fijar una distribución de tensiones viscosas:

$$v_t(z) = Ku^*z \left(1 - \frac{z}{H}\right)$$

Siendo:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{0.095256}{1000}} = 0.03086 \text{ m/s}$$

$$\tau_0 = \gamma HS_0 = 9800 \cdot 0.0972 \cdot 0.001 = 0.95256$$

Introduciendo esta misma fórmula al código del archivo de *nut* en las condiciones de contorno:

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM®: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / Operation | Version: 2.1.1 |
| \ / And | Web: www.OpenFOAM®.org |
| \ Manipulation | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volScalarField;
    location "0";
    object nut;
}
// *****//

dimensions [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
    leftWall
    {
        type fixedValue;
        value uniform 0;
    }

    frontWall
    {
        type nutkWallFunction;
        value uniform 0;
    }
    backWall
    {
        type fixedValue;
        value uniform 0;
    }
    inlet
    {
        type groovyBC;
        variables "u_f=0.0308;Ka=0.41;nu=(u_f*Ka)*(pos().z+0.001)*(1-
(pos().z+0.001)/0.0972);";
        valueExpression "-nu";
        value uniform 0;
    }
    outletair
    {
        type calculated;
        value uniform 0;
    }
    outletwater
    {
        type calculated;
        value uniform 0;
    }
    bottom
    {
        type nutkRoughWallFunction;
    }
}

```



```

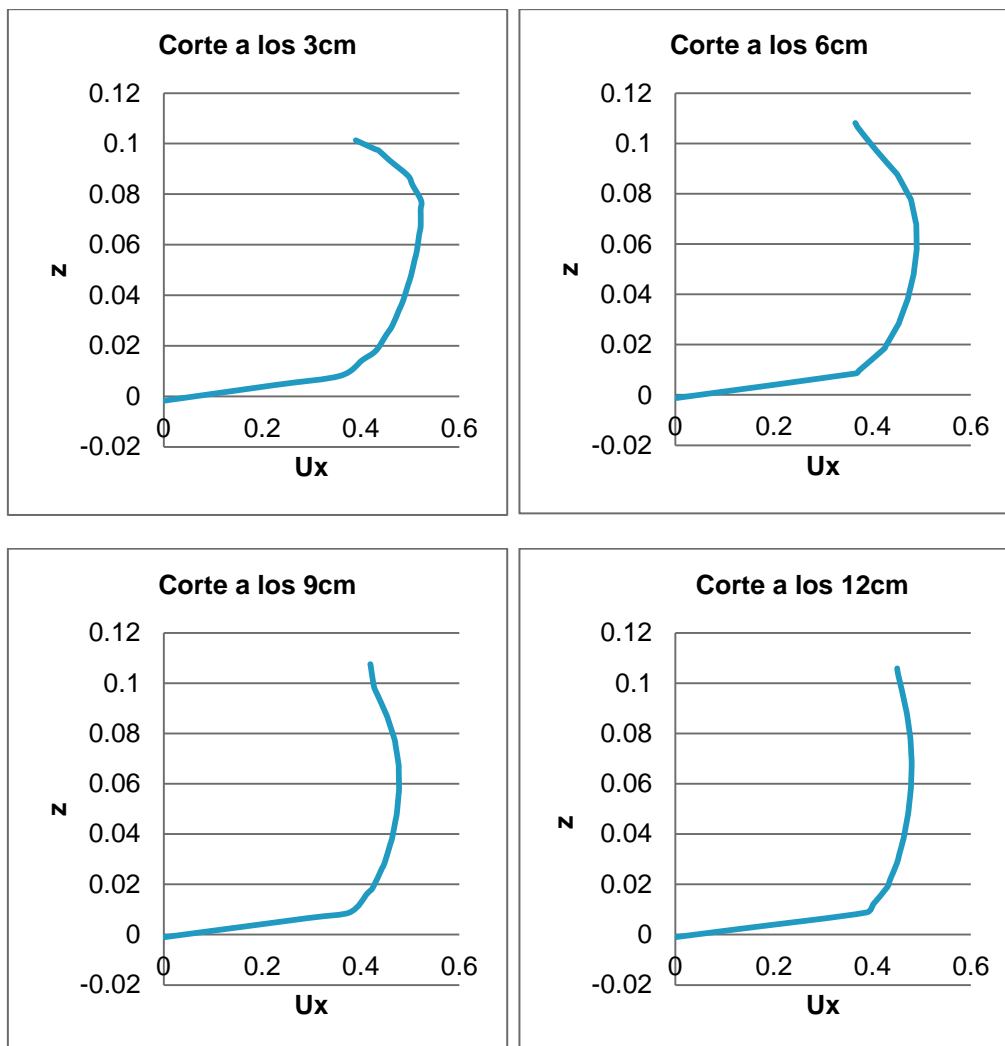
value uniform 0;
Ks uniform 0.0017;
Cs uniform 0.5;
}

atmosphere
{
  type      calculated;
  value     uniform 0;
}
defaultFaces
{
  type      empty;
}
}

```

```
// ***** //
```

Tras correr la simulación obtenemos una capa viscosa que se mantiene estable a lo largo del tramo estudiado. No obstante la zona superior del perfil de velocidades se sigue frenando al entrar en contacto con la fase *aire*, y posteriormente se distribuye de forma más uniforme frenando todo el perfil en su totalidad.



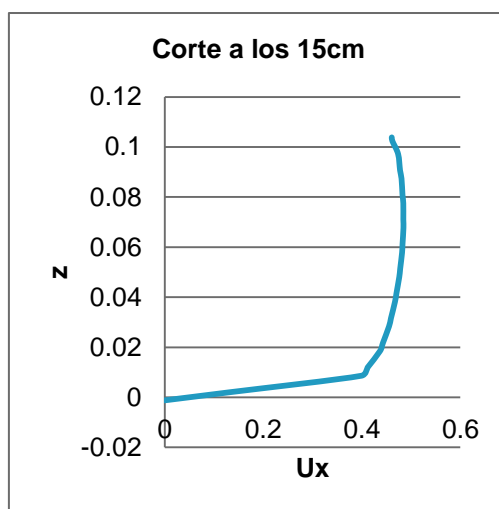


Ilustración 42 Evolución espacial de los perfiles de velocidades con condiciones de velocidad de entrada logarítmicas

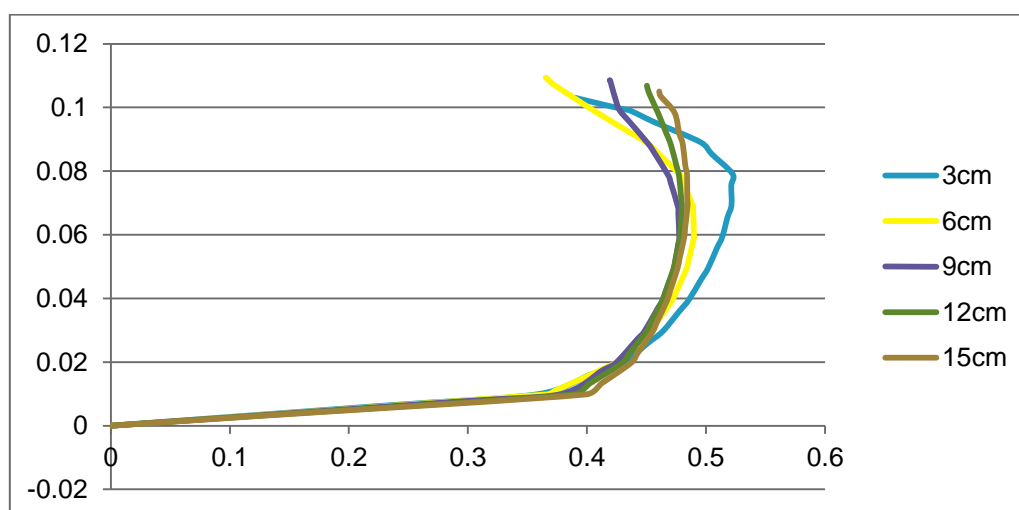


Ilustración 43 Evolución del perfil de velocidades en cortes equiespaciados cada 3 cm de longitud

Llegados a este punto, se debe poner una solución a el frenado de la interfase en el perfil logarítmico. Si tenemos en cuenta la presencia de la pila en la simulación y el hecho de que la superficie del lecho es irregular, los perfiles de velocidades que se miden dentro del dominio pueden verse alterados debido a estos condicionantes.

De esta manera se ha decidido realizar una simulación exclusiva para estudiar el comportamiento del fluido, en un canal con un lecho recto y sin obstaculos. De modo que los perfiles de velocidades no deberían variar en exceso a lo largo del mismo.

Debido a que no tenemos margen de maniobra al determinar las condiciones de contorno en el *inlet* y en el *outletwater*, puesto que ya vienen definidos por la ley logarítmica, los parámetros de la calibración serán las condiciones de contorno de U asociadas al *leftWall* y al *outletair* con tal de evitar el frenado de la capa superficial del fluido al entrar en contacto con el aire.

En primer lugar, se ha considerado la velocidad en ambos parches como *pressureInletOutletVelocity*, esta condición pivota U y P entre *fixedValue* y *zeroGradient* dependiendo de la dirección de U, y U la condicionada desde el flujo. Esta condición de contorno es la utilizada para fijar las velocidades en condiciones atmosféricas de esta manera estamos considerando ambos parches como prolongaciones del parche superior *atmosphere*.

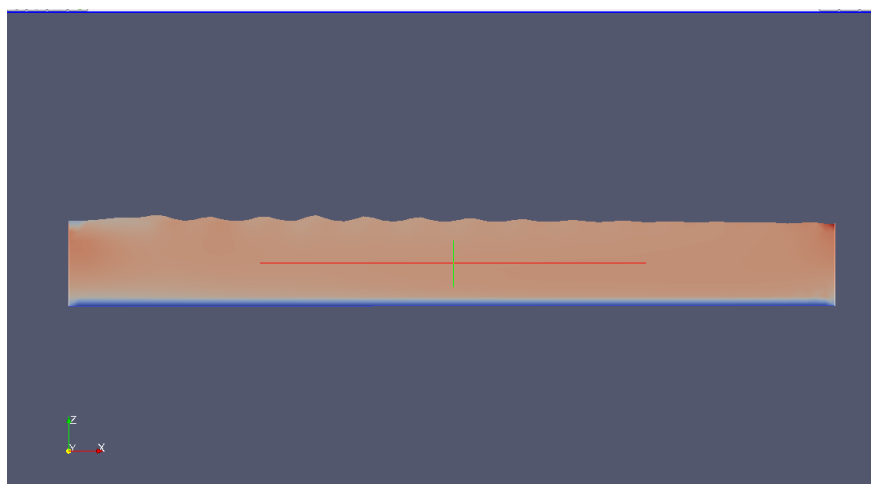


Ilustración 44 Sección longitudinal del canal de calibración con superficie rota por la tensión del aire

Tal y como se aprecia en la imagen, la capa viscosa del flujo se mantiene constante a lo largo del cauce. Sin embargo la zona más superficial del calado, asociada a la capa turbulenta presenta serias alteraciones con ondas que retrasan el fluido en su parte más elevada.

A fin de evitar estas fluctuaciones de velocidad en la superficie se ha decidido prolongar el perfil de velocidades a la zona del leftWall de manera que no haya un salto cuantitativo de velocidades en la interfase del medio líquido y el gaseoso y se eviten las tensiones generadas.

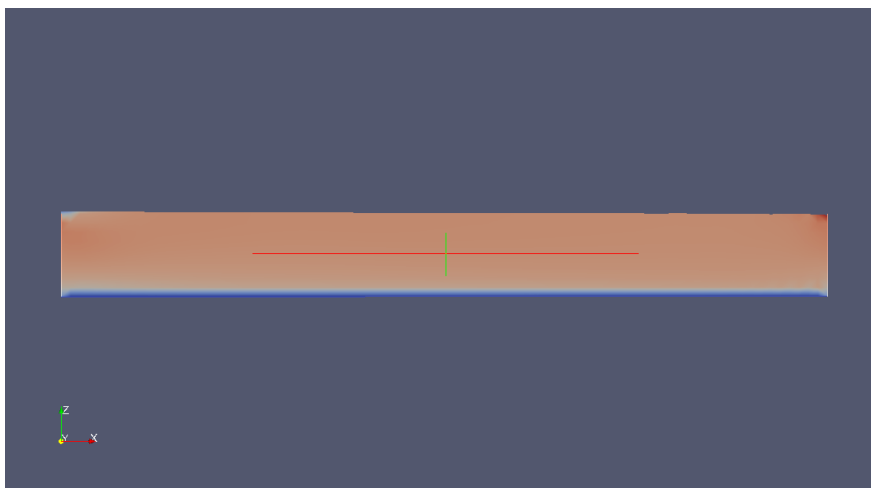


Ilustración 45 Sección longitudinal del canal de calibración con la superficie estabilizada

Según los datos obtenidos, la superficie se suaviza, eliminando la gran mayoría de las fluctuaciones generadas y obteniendo una distribución de velocidades constante a partir de los primeros 30 cm.

Una vez eliminada la espuma superficial que frenaba el modelo y partiendo de las condiciones de velocidades logarítmicamente uniformes, se ha vuelto a disponer la condición atmosférica en ambos parches para evitar que las velocidades de la fase *aire* alteren el realismo del experimento.

Tras realizar el proceso mencionado se han realizado mediciones del perfil de velocidades en tres cortes equiespaciados longitudinalmente en el canal.

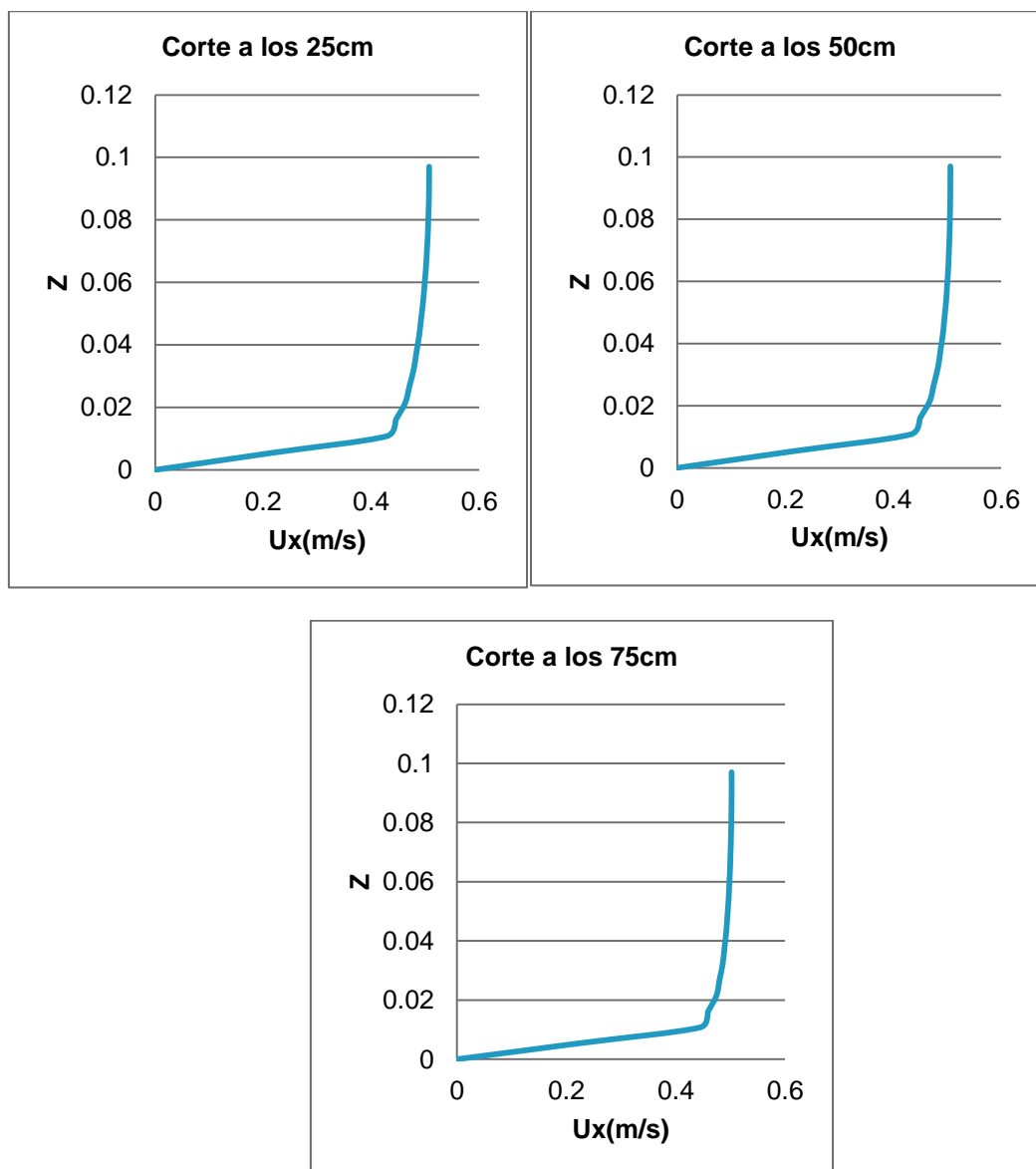


Ilustración 46 Evolución de los perfiles de velocidad en los tres cortes del canal de calibración

De esta manera se ha conseguido una variación en el perfil de velocidades a lo largo del canal muy baja. Es por eso que a pesar de que las condiciones de entrada por el momento no coinciden por las generadas por la ley de pared, tras recorrer los primeros 25cm alcanza un perfil de velocidades que se mantiene estable a lo largo del canal. A continuación procederemos a verificar el cumplimiento de la ley de muro de Theodore von Kármán.

5.3.3 LEY DE PARED

En este apartado, el objetivo que se busca es el de hallar las leyes de muro para los perfiles de velocidad obtenidos y comprobar que se adaptan a la curva teórica. Esta calibración es la más importante de todo el proceso, puesto que es la que dará validez al modelo K-Epsilon utilizado y permitirá hacernos a la idea de cuan cerca estamos de una situación real de flujo en lámina libre. Para ello seguimos trabajando con el modelo creado del canal recto a fin de la geometría irregular del caso no distorsione los resultados deseados.

En primer lugar, basándonos en el perfil de velocidades teórico ya calculado con anterioridad con la fórmula

$$u(z) = \frac{u^*}{K} \ln \left(\frac{30z}{K_s} \right)$$

Somos capaces de desarrollar nuestras curvas adimensionales U^+ y Z^+ siguiendo el esquema:

$$Z^+ = \frac{z \cdot u^*}{\nu}$$

Siendo:

$\nu = 1.003 \cdot 10^{-6}$, la viscosidad cinemática del agua a 20°C.

$$U^+ = \frac{u(z)}{u^*}$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos del perfil de velocidades teórico y la curva adimensional teórica:

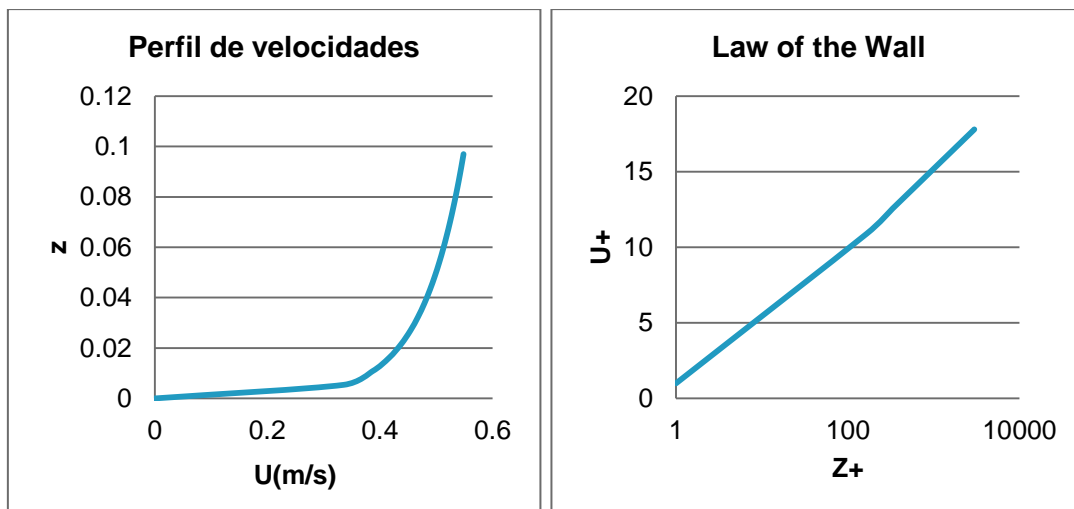


Ilustración 47 Perfil de velocidades y ley de pared teóricas según las condiciones del experimento

Si procedemos a comprobar el perfil de velocidades teórico y la ley de muro teórica con los calculados en el canal se observan los siguientes resultados:

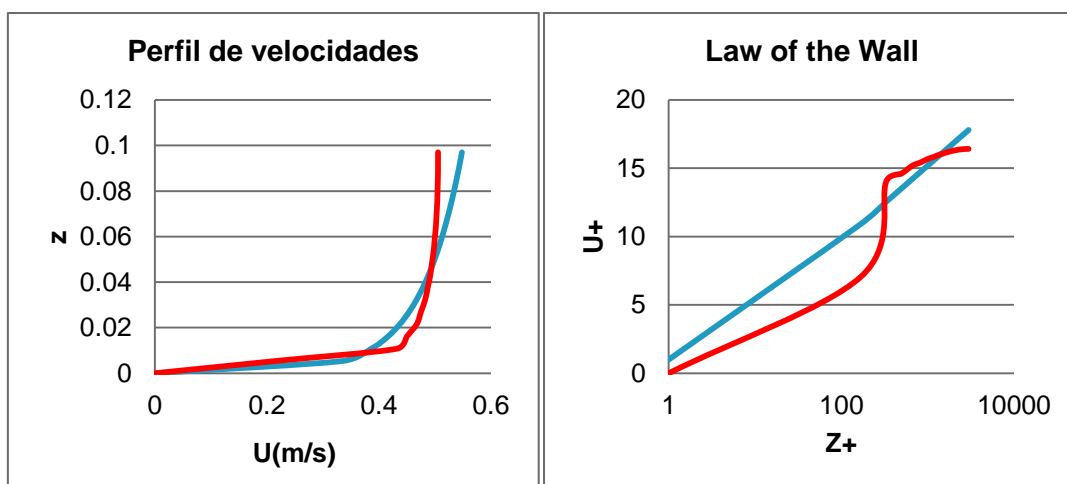


Ilustración 48 Comparación de curvas de velocidades y adimensionales en rojo y azul, para el caso simulado ($K=0.41$) y el caso teórico, respectivamente.

Como se observa en las curva del perfil de velocidades, el modelo que calcula el código es más viscoso de lo que debería ser, las curvas de ley de muro no coinciden en la pendiente de la zona turbulenta y la subcapa viscosa es demasiado alta.

Teniendo en cuenta la naturaleza de la ley logarítmica, cualquier modificación de la K_s o de las constantes que están incluidas dentro del logaritmo neperiano como por ejemplo E y C_s , solamente alterarán la posición de la curva adimensional sin ajustar su pendiente.

De esta manera las posibilidades de actuación son modificar parte del modelo K-Epsilon o la constante de Von Karman. Utilizando el modelo K-Epsilon, tal y como genera la ley de muro junto con la función `nutKRoughWallfunction` obtenemos un modelo excesivamente viscoso, y la modificación de sus constantes preestablecidas no alteran significativamente el comportamiento del fluido. En consecuencia, se han desarrollado una serie de experimentos modificando la constante de Von Karman, a pesar de que su valor esté altamente contrastado y verificado como 0.41, se ha decidido incrementarlo a fin de obtener un comportamiento menos viscoso y más acorde con la realidad. Se ha obtenido que para un valor de 0.81 el perfil de velocidades y la ley de muro son las que siguen:

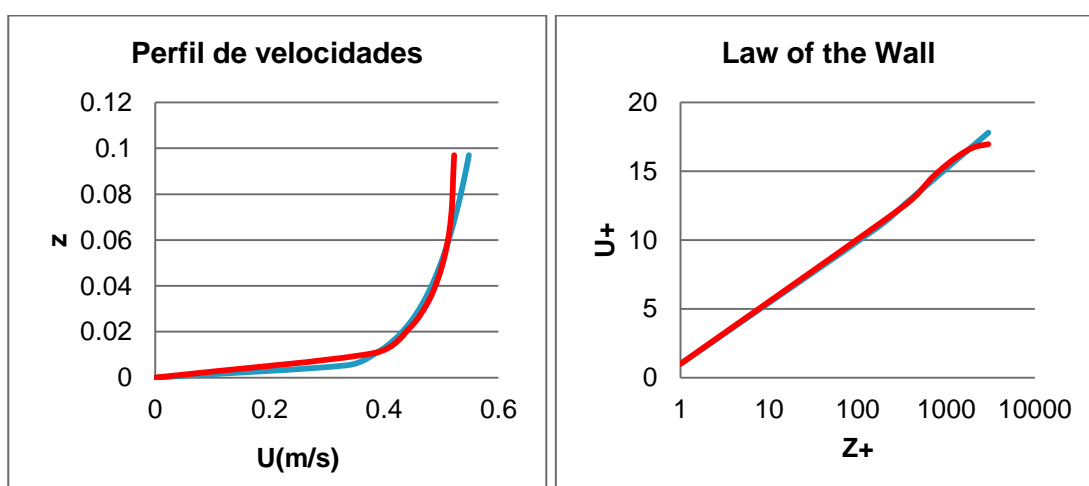


Ilustración 498 Comparación de curvas de velocidades y adimensionales en rojo y azul, para el caso simulado ($K=0.81$) y el caso teórico, respectivamente.

Como se aprecia en los resultados, al doblar la constante de Von Kármán se obtiene un buen ajuste de la capa viscosa y gran parte de la capa turbulenta. A fin de obtener una mejor calibración de la capa superficial y basándonos en las simulaciones iniciales del canal recto, ha repetido la simulación introduciendo un viento constante de 0.8 m/s de modo que pueda garantizar un perfil de velocidades estable en la zona turbulenta:

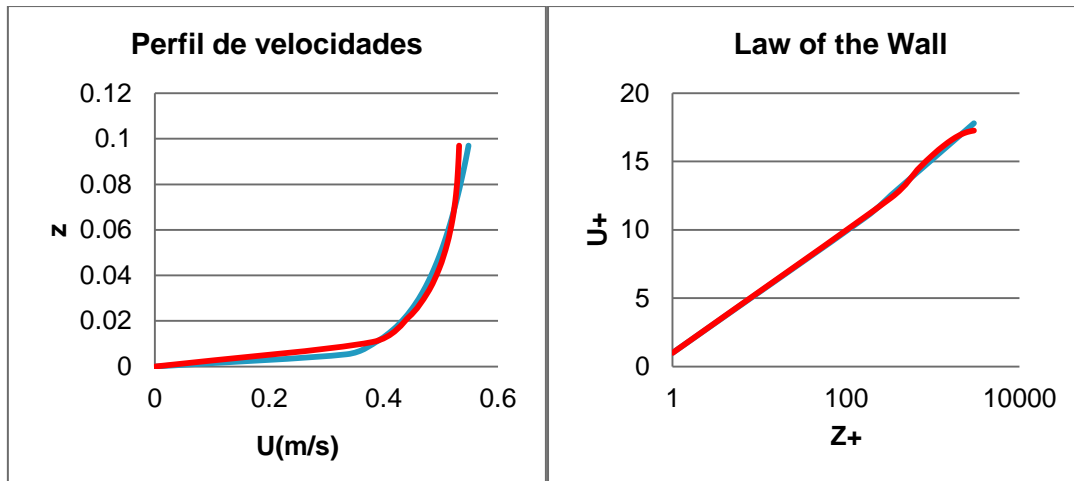


Ilustración 50 Comparación de curvas de velocidades y adimensionales en rojo y azul, para el caso simulado ($K=0.81$ y viento de 0.8 m/s) y el caso teórico, respectivamente.

Tal y como se aprecia realizando la modificación de la constante de Von Kármán se obtiene un buen ajuste del modelo k-Epsilon "Standard". El hecho de aumentar la turbulencia del modelo hace que los elementos que obstaculizan el fluido tengan un campo de influencia mucho más extenso para la ley de pared ajustada que no para la que se nos ofrece por defecto.

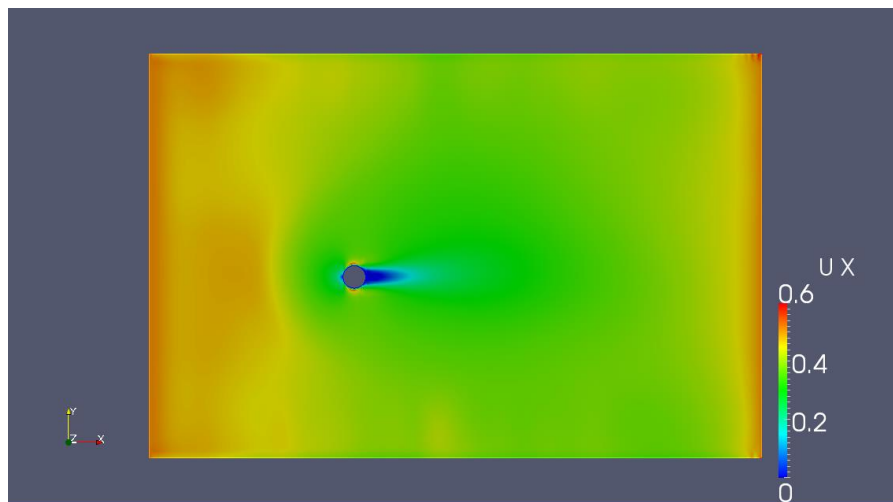


Ilustración 51 Corte en planta a una altura de 5cm (centro del flujo) y su distribución de velocidades en el eje X (datos con $K=0.41$)

Como se observa en la Ilustración 51 la distribución de velocidades es más homogénea y la afectación de los obstáculos en el comportamiento del flujo es muy leve y próxima, de manera que se comporta como un fluido excesivamente viscoso.

Por el contrario, en la ilustración 52, la pila frena el fluido prácticamente hasta alcanzar el parche de las condiciones de entrada, obteniendo unas velocidades más elevadas aguas debajo de la pila y más bajas aguas arriba de la misma.

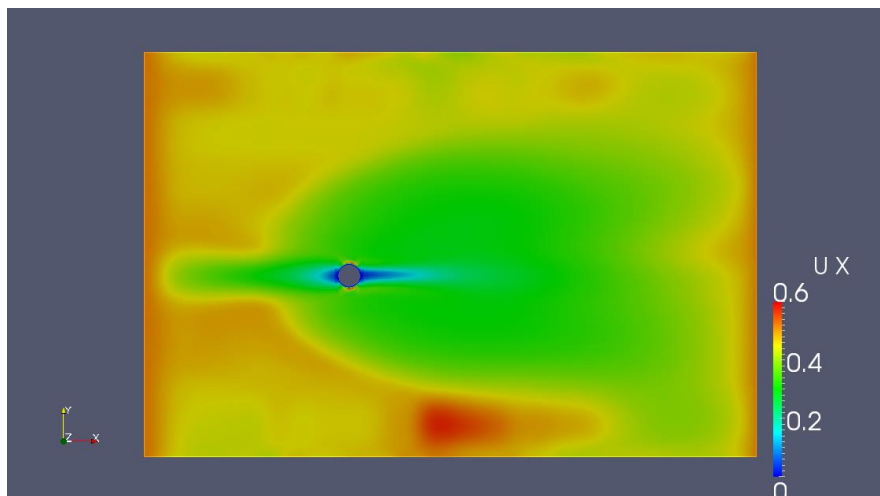


Ilustración 52 Corte en planta a una altura de 5cm (centro del flujo) y su distribución de velocidades en el eje X (datos con $K=0.81$)

6 RESULTADOS

Para el post-proceso, se ha utilizado el software ParaView, a través del cual es posible visualizar los resultados obtenidos con el *solver* del programa mediante el comando *paraFoam*. Es una herramienta muy potente y versátil capaz de desarrollar mapas de valores, gráficos y líneas de corriente.

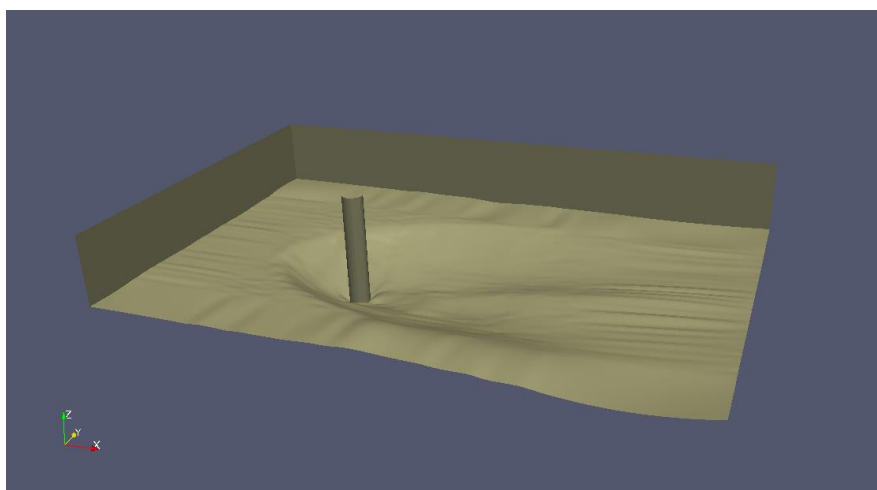


Ilustración 53 Foso de erosión y pila visualizado con ParaView

A través de los filtros que el programa ofrece podemos seleccionar visualizar los volúmenes con una proporción de volumen de fluido superior a 0.5 de manera que nos represente como se comporta la lámina libre del modelo.

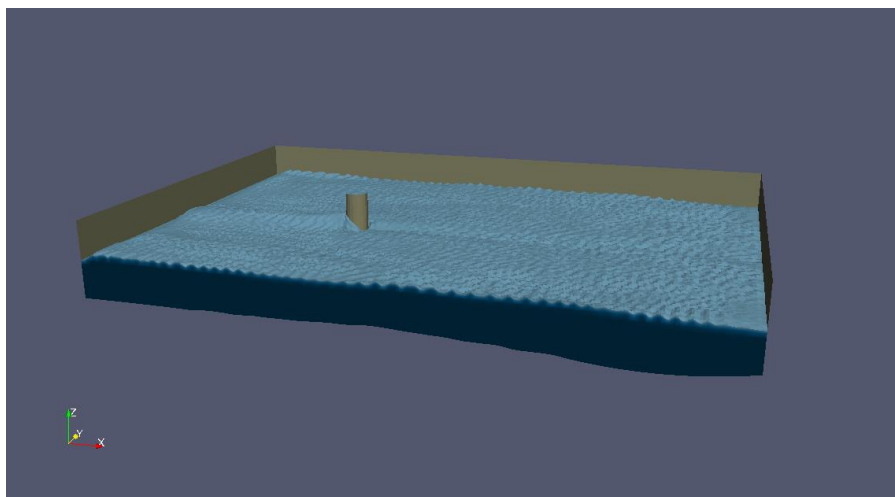


Ilustración 54 Posición de la lámina libre de fluido visualizado con ParaView (K=0.81)

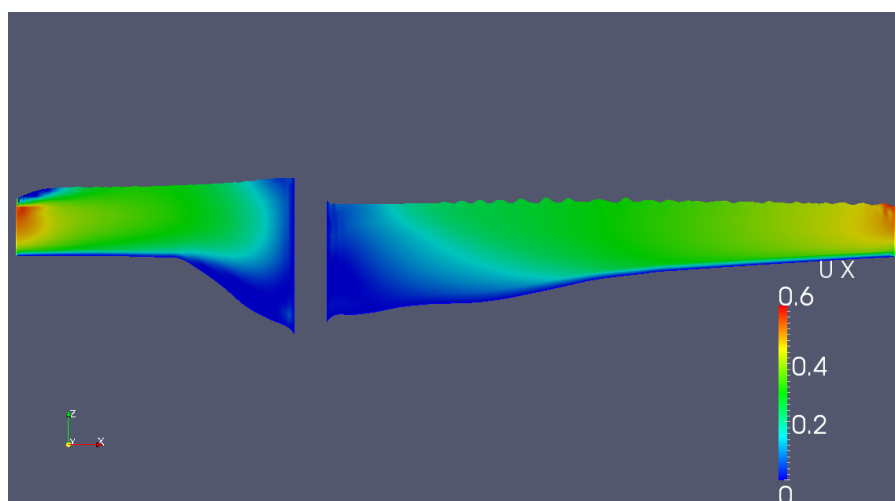


Ilustración 55 Corte longitudinal del perfil de velocidades visualizado con ParaView (K=0.81)

Tal y como se ha comentado con anterioridad, OpenFOAM® dispone de dos archivos de cálculo de presiones. De modo que podemos obtener un mapeado de presiones totales y otro de presiones que no consideren la presión hidrostática. Poder contemplar ambas es importante para poder ver la magnitud de las presiones aportadas por el fluido y en qué medida y en qué orden de magnitud alteran la hidrostática.

6.1 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES TOTALES

En primer lugar observamos la distribución de presiones totales. Tal y como se aprecia en la ilustración, estas presiones vienen marcadas fuertemente por el calado característico del flujo en cada punto. De manera que se presentan las presiones más elevadas en la zona frontal de la pila y con altos gradientes y aguas debajo de la misma muestran una transición más suave de las presiones alcanzando valores más moderados, tal y como sucede con la geometría del foso de erosión.

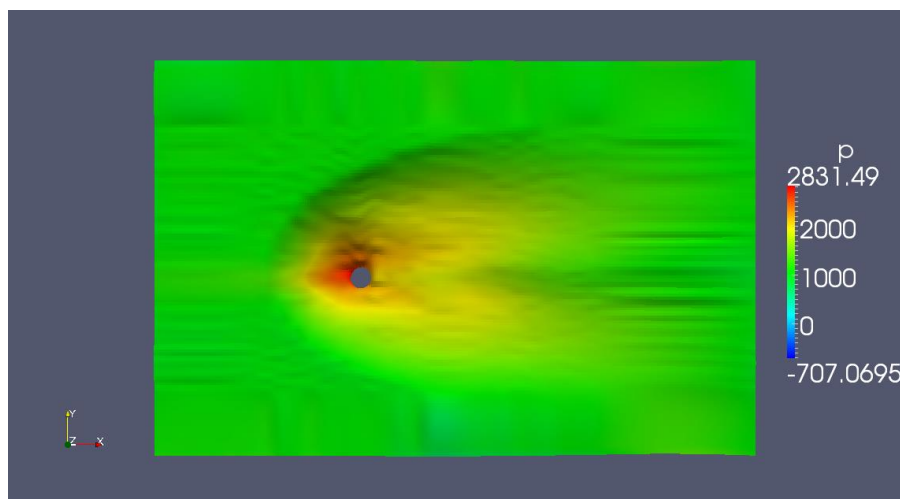


Ilustración 56 Mapa de distribución de presiones totales en planta

No obstante, es posible observar que la pila proyecta una sombra de presiones sobre el lecho en dirección paralela al flujo.

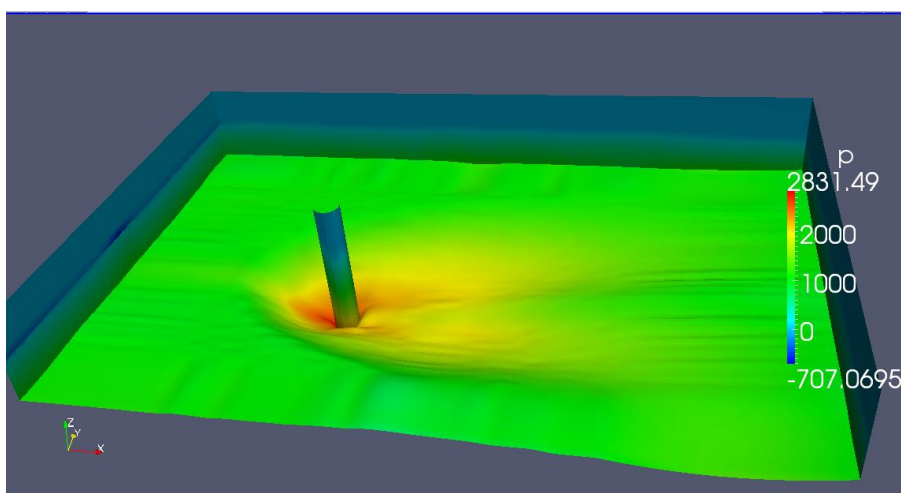


Ilustración 57 Vista oblicua de la distribución de presiones totales del lecho

Si efectuamos un corte longitudinal del foso que pase por el centro de la pila es posible ver como en mayor medida, las presiones totales coinciden con la batimetría del foso. De esta manera, dejan en evidencia que las presiones hidrostáticas predominan sobre las presiones ejercidas por el flujo.

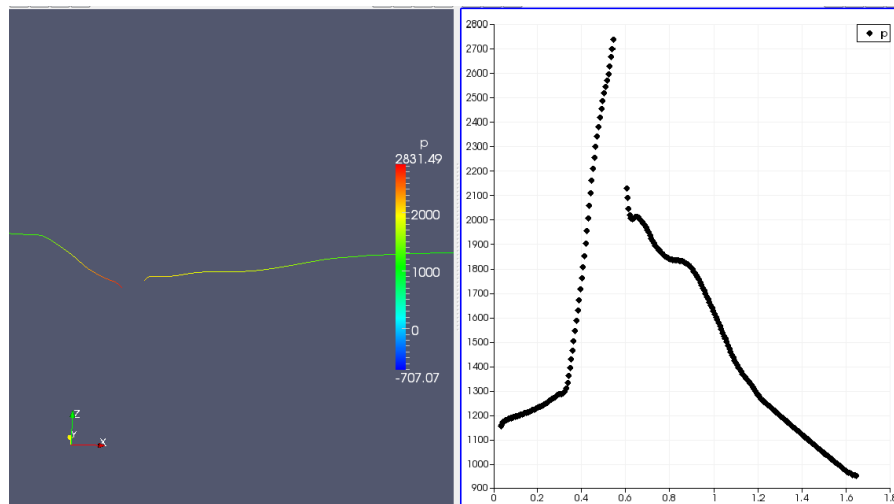


Ilustración 58 Distribución de presiones longitudinal en el centro del lecho ($K=0.81$)

Tal y como se observa en ambos cortes, las presiones siguen manteniendo una correlación directa con las formas del foso. En el corte transversal se observa la afectación de la asimetría del foso experimental y su incidencia directa en la distribución de presiones, obteniendo presiones un 10% mayores al costado de la pila más cercano al muro posterior.

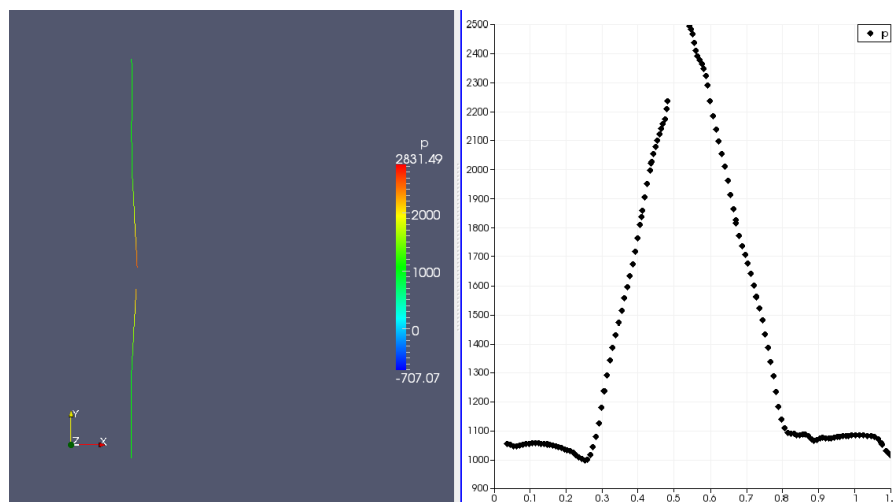


Ilustración 59 Distribución de presiones transversal en el eje de la pila ($K=0.81$)

A continuación pasaremos a estudiar que presiones se han obtenido de p^* a fin de poder comparar el grado de afectación sobre el lecho frente a las presiones totales.

6.2 DISTRIBUCIÓN DE P_RGH

Tal y como se comentado con anterioridad, el gradiente de presiones modificado suprime la componente hidrostática de manera que:

$$\nabla p^* = \nabla P - \nabla(\rho g \cdot x) = \nabla P - \nabla \rho g - g \cdot x \nabla \rho$$

De este modo visualizando los resultados de la p^* la sombra proyectada por la pila del foso se hace aún más evidente que en las presiones totales llegando a obtener un gran salto de presiones entre la situación de aguas arriba de la pila y la de aguas abajo.

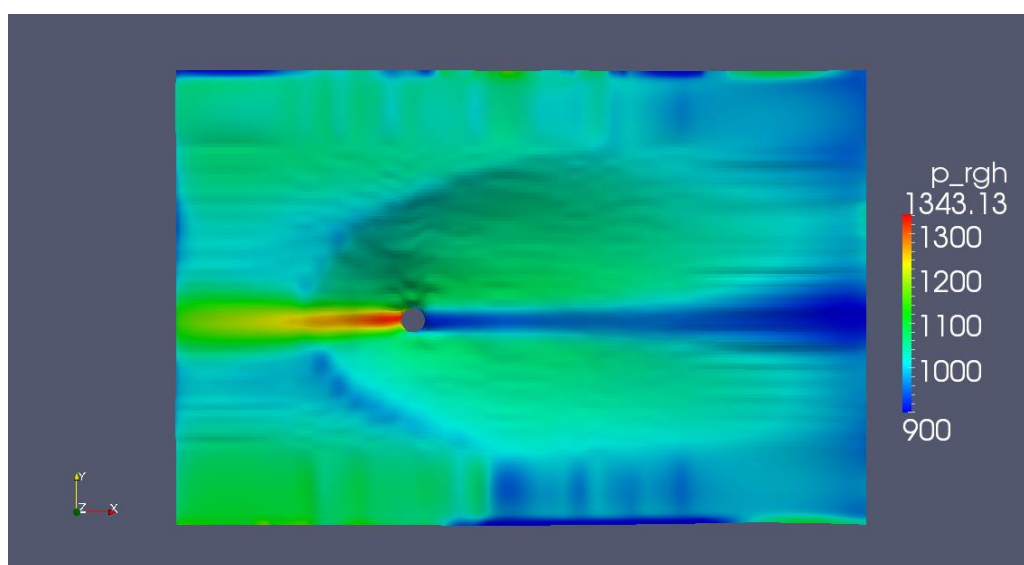


Ilustración 60 Distribución de p^* en planta para el modelo ajustado con $K=0.81$

Si representamos los cortes longitudinales y transversales de la distribución de presiones con centro en la pila, los resultados obtenidos son los siguientes:

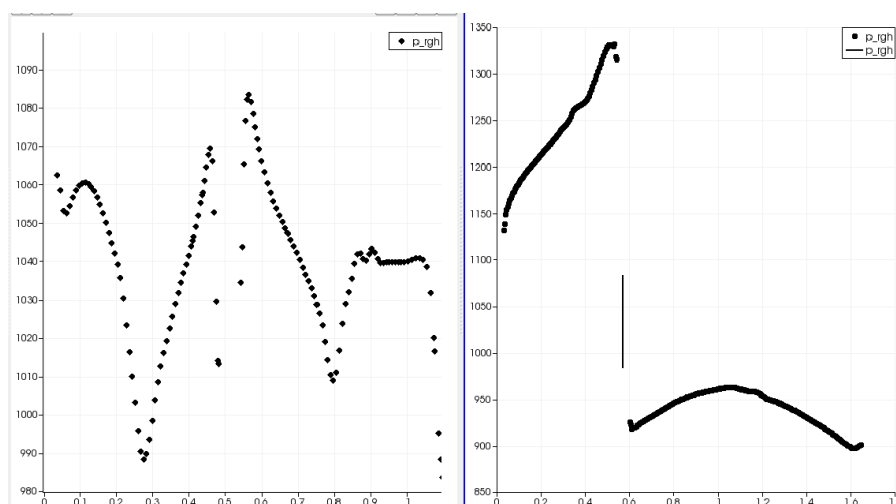


Ilustración 61 A la izquierda, corte transversal de foso. A la derecha, corte longitudinal, ambos centrados en la pila ($K=0.81$).

A fin de ofrecer una comparativa con el modelo computado con los parámetros de serie, se muestran en la siguiente ilustración, las presiones no hidrostáticas obtenidas con una K de von Kármán de 0.41.

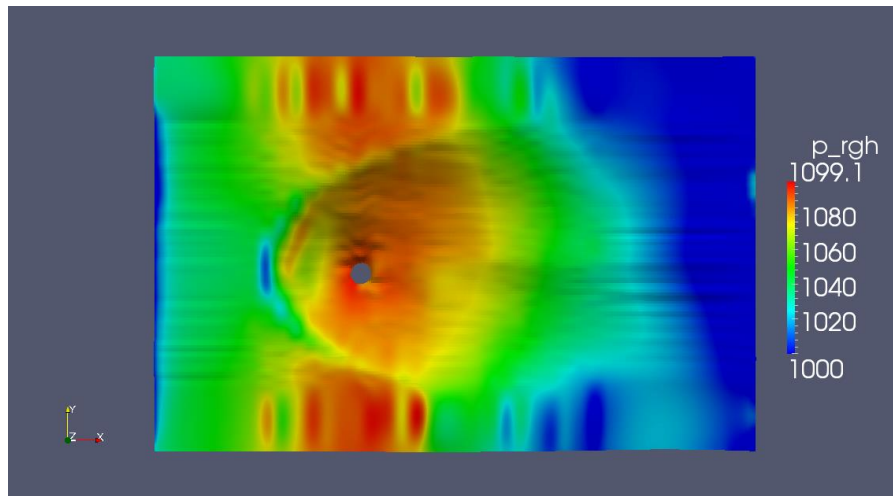


Ilustración 62 Distribución de p^* en el foso de erosión para $K=0.41$

Tal y como se aprecia en la distribución de presiones obtenida, si no se ajustan las velocidades la variación de velocidades a lo largo del foso y su afectación por la presencia de la pila es prácticamente despreciable. De esta manera se obtienen presiones máximas de 1099.1 kg/m^2 frente a los 1343.13 kg/m^2 del perfil de velocidades correcto.

7 CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones extraídas de la tesina, teniendo en cuenta los objetivos que se marcaron en un inicio y los matices importantes que se deben considerar para cada uno de los resultados obtenidos:

1. Se ha desarrollado satisfactoriamente el cálculo de la distribución de presiones en la superficie del lecho del foso de erosión de la pila, detallando los procesos seguidos y siguiendo fieles a la geometría obtenida en los experimentos y a las condiciones hidráulicas que desarrolló Elyanne Rodríguez en 2007.
2. Se ha conseguido desarrollar un método de generación de mallas estructuradas muy robusto y de buena calidad, de una forma visual, inteligible, y exportable a un formato compatible con la gran mayoría de programas de cálculo mediante discretización de volúmenes finitos
3. Las simulaciones realizadas han sido computadas implementando el modelo k-Epsilon de turbulencia. Este modelo ha demostrado disponer una ley de pared que no se adapta a las condiciones de lámina libre que requería el caso a estudiar y por ello se han debido calibrar los parámetros que éste utiliza.
4. Se han obtenido resultados claros sobre cómo afectan los valores de la rugosidad K_s al perfil de velocidades de lámina libre.
5. El valor de la constante de Kolmogorov ha sido contrastada y comprobada experimentalmente por muchos autores. El hecho de ajustarla al comportamiento turbulento que se ha querido obtener, no justifica que esté bien empleada. No obstante, a falta de investigar en otros modelos de turbulencia como por ejemplo el k-Omega SST, se ha comprobado que tiene una influencia notable en el comportamiento del fluido. Es por ello, que el valor introducido no tiene validez física, su objetivo es reajustar las velocidades al logaritmo teórico.
6. Se ha demostrado la alta importancia de disponer de un modelo que reproduzca a la perfección el perfil de velocidades y la curva adimensional teórica. Pequeñas variaciones en el perfil de velocidades del orden del 5-10%, han desarrollado figuras mapas totalmente diferentes de distribuciones presiones, con unas diferencias del 30% en las presiones máximas obtenidas.

8 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Tal y como se comentó en los objetivos de la presente tesina, una parte muy importante de este documento será el valor práctico y didáctico que pueda ofrecer. De este modo, no se perderán los meses de aprendizaje y de tratar de plasmarlo en un documento físico,

Un campo de investigación que sería altamente recomendable sería el de profundizar más en el modelo k-Epsilon y la afectación de los parámetros y el código que lo caracteriza. Como se ha visto, se han podido solucionar los problemas de alta viscosidad del modelo a un alto coste. Modificar la constante de von Kármán, debería ser substituido en un futuro por mejoras en las definiciones de las condiciones de contorno y de leyes de pared. A fin de obtener un código más robusto que se adapte canales abiertos con cualquier característica hidráulica.

Un estudio exhaustivo de todos los métodos de turbulencia que se conocen y el grado de afectación en los comportamientos viscosos de los flujos, que contraste de manera clara y práctica las ventajas y desventajas de unos frente de otros.

Por último, una distribución de presiones junto con las características hidráulicas del flujo, puede permitir desarrollar un estudio de filtraciones bajo el lecho del foso de erosión, mediante herramientas como por ejemplo ModFlow, tal y como ya se han utilizado en otras tesinas de la escuela como la Tesina de Victor Gracia. Mediante las filtraciones obtenidas se podrá obtener una modificación del estado de equilibrio de las partículas que rodean la pila de un puente y contrastarla con las investigaciones de Bateman en 2005.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Juan P. Martín Vide, "Ingeniería de ríos" ISBN 84-8301563-3, Edicions UPC, S.L. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 210 págs.(2003)

Launder,B.E.; Spalding, D.B, "The numerical computation of turbulent flows". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **3** (2): 269–289. . (March 1974).

<http://www.usgs.gov/> [Consulta: 5 de Junio del 2015].

Elyanne Rodriguez "Estudio experimental de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puente circular", tutor: Allen Bateman, (2007)

Shields, A. *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung* [Application of similarity mechanics and turbulence research on shear flow] (1936)

Reynolds, Osborne. «An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels». *Philosophical Transactions of the Royal Society* **174** (0): 935–982.(1883).

Kolmogorov, Andrey Nikolaevich. "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers". *Proceedings of the USSR Academy of Sciences (in Russian)* **30**: 299–303(1941).

Colebrook, C. F. "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transitional region between smooth and rough wall laws", *J. Inst. Civil Eng.* **11**, 133–156,(1939).

Bateman, A., Fernández, M., and Parker, G. *Morphodynamic model to predict temporal evolution of local scour in bridge piers. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM*, pages 911–920.(2005).

Berverovic E., Hinsberg N.P., Jakirlić S., Roisman I.V., and Tropea C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution. *Physical Review E*, **79**, (2009).

Courant, R.; Friedrichs, K.; Lewy, H. "Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik", *Mathematische Annalen (in German)* **100** (1): 32–74.(1928)

von Kármán, Th. (1930), "Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz", *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Fachgruppe 1 (Mathematik)* **5**: 58–76

H.K. VERSTEEG and W. MALALASEKERA, *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volumen method*, *British Library Cataloguing in Publication data.*: 245-255 (1995)

<http://cfd.direct/> [Consulta: 2 de Junio del 2015].

Ferziger i Perić, "Computational Methods for Fluid Dynamics" Ed. Springer, (2002).

Davidson, L. "An Introduction to Turbulence Models", *Chalmers University of Technology. Department of Thermo and Fluid Dynamics*, Göteborg, Sweden,(2011).

Oliver Rübenkönig, Albert Ludwigs. *The Finite Difference Method (FDM) - An introduction*, *Universidad de Friburgo*,(2006),

- H.G. Weller, *A code independent notation for finite volume algorithms.*, Technical Report TR/HGW/01, Nabla Ltd.(2002)
- Wilcox, David C. "Turbulence Modeling for CFD". Second edition. Anaheim: DCW Industries, 1998. pp. 174. (1998)
- Wilcox, D. C., "Formulation of the k-omega Turbulence Model Revisited," *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 11, pp. 2823-2838.(2008)
- Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for ...Models for Aerodynamic Flows," *AIAA Paper 93-2906*, (July 1993).
- Allen, J. J, Shockling M.A, Kunkel G.J, Smits A.J "Tubulent flow in smooth and rough pipes", *Phil. Trans. R. Soc. A* 2007 365, doi: 10.1098/rsta.2006.(1939)
- Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. (1997), "Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development", *NASA Technical Memorandum 110446*.
- Aris, Rutherford, *Mathematical Modeling: A Chemical Engineer's Perspective*. Academic Press(1999).
- Rusche, H. *Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions*. Ph.D. thesis, Imperial College, University of London. (2002).
- Hirt and B.D. Nichols. *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, November, 1979.
- CFD Online, "Law of the wall", Disponible en: www.cfd-online.com [última visita: 28 de Mayo del 2015]. (2011)
- Hassan Hemida, *OpenFOAM® tutorial: Free surface tutorial using interFoam and rasInterFoam* Division of Fluid Dynamics, Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden (April, 2008)
- Hiroji NAKAGAWA, Iehisa NEZU. *Taylor & Francis, Turbulence in open channel flows*. - Technology & Engineering - 293 pages. (Jun 7, 1993)
- Victor Gracia Martin, *Estudio experimental de la distribución de presiones alrededor de una pila de puente*, (2014)